

**UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID  
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR**



**Ciencia e Ingeniería de Materiales e Ingeniería Química**

**INGENIERIA INDUSTRIAL**

**PROYECTO FIN DE CARRERA**

**OPTIMIZACION DEL PROCESO DE  
PELETIZACION DE FANGOS  
PROVENIENTES DE LA DIGESTION  
ANAEROBIA DE LOS RESIDUOS DEL  
MERCADO DE ABASTOS DE AMBATO, REP.  
DE ECUADOR**

---

AUTOR:	GONZALO ALEGRE AGUDIN
TUTOR UCIIM:	ANTONIO AZNAR JIMÉNEZ
TUTOR UTA:	OCTAVIO BELTRÁN VILLEGAS

JUNIO 2012



Título: Optimización del proceso de peletización de fangos provenientes de la digestión anaerobia de los residuos del mercado de abastos de Ambato, Rep. de Ecuador.

Autor: Gonzalo Alegre Agudín

Tutor: Antonio Aznar Jiménez.

## EL TRIBUNAL

Presidente:

Secretario:

Vocal:

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 2012 en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de:

PRESIDENTE

SECRETARIO

VOCAL

## AGRADECIMIENTOS

---

*Quiero empezar agradeciendo a mis padres su paciencia y su ayuda permanente, que me han permitido llegar hasta este día. Gracias de corazón por ser como sois. También a Irene y Carlos, esos enanos (ya no tanto) que están ahí siempre para aguantarme. Y a mis tíos y mi abuela también, porque sé que este día les hace muy felices.*

*A mi tutor, Antonio, por ayudarme durante este proyecto pero sobre todo por darme la oportunidad de vivir una experiencia inolvidable.*

*A toda la gente de Ecuador, que me hicieron sentir uno de los suyos en un país tan lejano y tan distinto. En especial a Kiko y María, que me acogieron en su casa, me enseñaron su precioso país y desde el primer día me trataron como a su hijo; en general a toda la gente que conocí allí, que me lo dieron todo y me hicieron pasar ratos increíbles; Estefanía, Tony, Dany, Josué y Enrique, gracias por vuestra amistad y todos los buenos ratos que pasamos juntos. Sabéis que en Madrid tenéis un amigo.*

*A toda la gente de la UTA, por lo bien que me trataron. Especialmente a “Messi” y a Marcelo, sin los cuales no habría sido posible realizar este proyecto, y a Octavio, por su ayuda y por ese sentido del humor inigualable que amenizaba los momentos complicados. Tú también tienes un amigo en Madrid, ya lo sabes.*

*No me olvido de Fabio, Jorge, Leo, Omar, Sandra, Diana, Julio... cuidaros mucho, volveremos a vernos pronto. Y a ti también Giovanni, que recogiste en el aeropuerto a un chaval asustado y le diste la tranquilidad que necesitaba; estés donde estés no me olvidaré de ti.*

*A todos mis amigos de la UCIIM, por ayudarme y pedirme ayuda, por tantas y tantas risas y todos los ratos inolvidables que hemos pasado. Esta carrera sin vosotros no habría sido igual. No voy a enumeraros a todos porque para mi suerte sois muchísimos, pero sabéis quienes sois y que aquí estoy para lo que sea.*

*A los amigos que he ido conociendo por la vida y que también me han acompañado cuando me ha hecho falta; Desde el cole hasta los 30, gracias a todos.*

*A mi hermano Fer; tú te mereces un aparte por estar desde el minuto uno hasta el noventa. Mucho tiempo juntos y nos seguimos aguantando. No cambies. (Sí, tenía final...)*

*Y a la mejor persona que la vida me dio oportunidad de conocer y a la que más he querido, compañera tantos años, por su cariño y por intentar hacerme mejor persona; tú has sufrido conmigo los peores ratos y siempre has estado ahí, y sé que siempre estarás. Sea como sea, siempre serás parte de mi vida. Esto va por ti Carol, eres la mejor.*

## RESUMEN

---

Este Proyecto Fin de Carrera surge a partir de un Acuerdo Marco de Cooperación Interuniversitaria entre la Universidad Carlos III de Madrid y la Universidad Técnica de Ambato, República del Ecuador. El proyecto recibió apoyo y financiación de la Universidad Carlos III en su Convocatoria de Ayudas para Acciones de Cooperación al Desarrollo de Junio de 2011, siendo seleccionado en primer lugar, y de la Asociación Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID).

El proyecto ideado tiene un año de duración y financiación, por lo que este documento escrito solo supone la base y el primer paso de un proyecto más largo y extenso de Cooperación Internacional. La primera actividad a realizar en Ecuador fue desarrollar y construir un laboratorio de digestión anaerobia que sirviera para experimentar en esta tecnología con los residuos orgánicos producidos en los distintos mercados agrícolas del país. La instalación a construir se compone de 12 digestores de 20 litros, un acumulador de biogás que permita la utilización del mismo, distintos aparatos de medida de volumen y un secador térmico rotativo para tratar el fertilizante o compost obtenido en el proceso de digestión.

Después de terminar la instalación, el segundo paso es realizar un primer ensayo sobre ella con distintos valores de algunos de los parámetros conocidos que influyen en el proceso de digestión anaerobia. En concreto en este ensayo se probará con distintos valores de pH y sólidos totales, manteniendo otros como temperatura o tiempo de retención hidráulico constantes. El objetivo es hallar una combinación de éstas variables para optimizar el compost producido, que en la mayoría de ensayos hasta la fecha ha sido bastante descuidado. El biogás producido se analizará periódicamente para comprobar el caudal generado y su capacidad calorífica según las distintas variables con las que ensayamos, y posteriormente será utilizado como combustible en la máquina secadora, también llamada trómel.

De esta forma se busca principalmente obtener un compost libre de patógenos, rico en nutrientes, de un tamaño practicable y sin humedad en su interior tras el tratamiento de secado térmico, siendo el objetivo final que esta pequeña instalación derive en un futuro en una planta piloto de pellets de fertilizante, fáciles de transportar y de alimentar al terreno y por supuesto con una acción óptima sobre éste.

**Palabras clave:** cooperación, digestor anaerobio, tromel, biogás, compost, gasómetro, pH, temperatura, secado térmico, pellet.



## ABSTRACT

---

This end of career project is a framework agreement for inter-university cooperation between the Universidad Carlos III de Madrid and the Universidad Técnica de Ambato, Republic of Ecuador. The project received support and funding from the Universidad Carlos III in his call for aid for actions of cooperation to the development by June 2011, being selected first, and of the Spanish Association for International Cooperation for Development (AECID).

The project developed has a year's duration and funding, so this document only represents the basis and the first step of a larger project of international cooperation. The first activity in Ecuador was to develop a laboratory of anaerobic digestion, serving there for experience in this technology with organic waste produced in the different agricultural markets in the country. Installation building consists of 12 digesters of 20 liters, an accumulator of biogas which permits its use, different devices of volume measurement and a rotating heat dryer to treat the fertilizer or compost obtained in the process of digestion.

After installation is complete, the second step is a first test on it with different values of some of the known parameters that influence the process of anaerobic digestion. Specifically in this essay we tested with two different values of pH and total solids, keeping others, temperature and hydraulic retention time, in a constant value. The goal is to find a combination of these variables to optimize the produced compost, which in the majority of trials to date has been quite neglected. The biogas produced will be analyzed periodically to check the generated flow and its heat capacity according to the different variables that we tested, and subsequently will be used as fuel in the drum machine.

In this way seeks mainly to obtain a free of pathogens compost, rich in nutrients, a practicable size and without moisture inside after the treatment of thermal drying, being the ultimate goal arising by this small facility in the future in a factory of fertilizer pellets, easy to transport and feed the ground and of course with an optimal action on it.

**Keywords:** cooperation, anaerobic digester, trommel, biogas, compost, gas meter, pH, temperature, thermal drying, pellet.



# INDICE

<b>AGRADECIMIENTOS .....</b>	<b>II</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>III</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>IV</b>
<b>INDICE .....</b>	<b>V</b>
<b>INDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>VII</b>
<b>INDICE DE TABLAS.....</b>	<b>IX</b>
<b>1. INTRODUCCION.....</b>	<b>1</b>
1.1- MOTIVOS DEL PROYECTO .....	1
1.2- ANTECEDENTES .....	2
1.3- OBJETIVOS DEL PROYECTO .....	3
1.4- AYUDA A LA COOPERACION Y AL DESARROLLO .....	4
<b>2. FUNDAMENTOS .....</b>	<b>5</b>
2.1- DIGESTION ANAEROBIA.....	5
2. 1. 2 – PARAMETROS OPERACIONALES: .....	8
2. 1. 3 – VENTAJAS DE LA DIGESTION ANAEROBIA:.....	13
2.2- DIGESTOR ANAEROBIO .....	14
2. 2. 1 – BIODIGESTOR DISCONTINUO:.....	14
2. 2. 2 – BIODIGESTOR CONTINUO: .....	15
2. 2. 3 – BIODIGESTOR DE SEGUNDA Y TERCERA GENERACION:.....	17
2.3- BIOGAS .....	18
2. 3. 1 – COMPOSICION DEL BIOGAS: .....	18
2. 3. 2 – SUSTRATOS PARA OBTENCION DE BIOGAS:.....	18
2. 3. 3 – USOS DEL BIOGAS: .....	19
2.4- BIOL Y COMPOST .....	20
2. 4. 1 – BIOL:.....	20
2. 4. 2 – COMPOST:.....	20
<b>3. DESCRIPCION DEL PROYECTO .....</b>	<b>22</b>
3.1- DISEÑO DEL EXPERIMENTO .....	22
3. 1. 1 – TEMPERATURA: .....	23
3. 1. 2 – TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICO: .....	23
3. 1. 3 – pH: .....	24
3. 1. 4 – SOLIDOS TOTALES: .....	25
3. 1. 5 – PORCENTAJE DE MATERIA ANIMAL Y VEGETAL:.....	25
3.2- DISEÑO DE LA INSTALACION .....	26
3. 2. 1 – ELECCION DEL TERRENO:.....	26
3. 2. 2 – ESQUEMA DE LA INSTALACION:.....	28
3.3- CONSTRUCCION DE UN DIGESTOR BATCH.....	29
3. 3. 1 – MATERIALES Y HERRAMIENTAS UTILIZADOS:.....	29
3. 3. 2 – CONSIDERACIONES: .....	30



3. 3. 3 – CONSTRUCCION PASO A PASO:	30
3. 3. 4 – CONSEJOS CONSTRUCTIVOS:	33
3. 3. 5 – POSIBLES MEJORAS CONSTRUCTIVAS:	34
3.4- MEDIDORES DE VOLUMEN DE BIOGAS Y METANO	34
3. 4. 1 – MEDIDOR DE VOLUMEN DE BIOGAS:	34
3. 4. 2 – MEDIDOR DE VOLUMEN DE METANO:	40
3.5- CONSTRUCCION DE LA INSTALACION COMPLETA	44
3. 5. 1 – BOTELLAS VALVULA DE SEGURIDAD:	44
3. 5. 2 – TUBERIA PRINCIPAL:	44
3. 5. 3 – SECUESTADOR DE GAS CARBONICO:	45
3. 5. 4 – ACUMULADOR DE GAS:	47
3. 5. 5 – SISTEMA DE CALEFACCION Y REFRIGERACION:	47
3.6- DESARROLLO DEL EXPERIMENTO	50
3. 6. 1 – PREPARACION DEL RESIDUO:	50
3. 6. 2 – CALCULO DE SOLIDOS TOTALES:	52
3. 6. 3 – PUESTA A PUNTO:	55
3. 6. 4 – CONTROL Y OPERACIONES DURANTE EL PROCESO:	56
<b>4. SECADO TERMICO DEL COMPOST</b>	<b>57</b>
4.1- FUNDAMENTOS DEL SECADO TERMICO	57
4. 1. 1- SECADO DIRECTO:	57
4. 1. 2- SECADO INDIRECTO:	58
4.2- VENTAJAS TECNICAS DEL SECADO TERMICO	58
4.3- SECADO DIRECTO CON MAQUINA ROTATIVA TROMEL	59
4.4- CONSTRUCCION DEL TROMEL DE LABORATORIO	62
4. 4. 1- PAUTAS PARA EL DISEÑO:	62
4. 4. 2- ESQUEMA DEL DISEÑO:	63
4. 4. 3- MATERIALES UTILIZADOS:	63
4. 4. 4- CONSTRUCCION DEL TROMEL:	64
4. 4. 5- MEJORAS CONSTRUCTIVAS:	69
<b>5. RESULTADOS</b>	<b>72</b>
5.1- RESULTADOS DE LA DIGESTION ANAEROBIA	72
5. 1. 1- VOLUMEN DE BIOGAS Y DE METANO:	72
5. 1. 2- CAPACIDAD CALORIFICA:	80
5.2- RESULTADOS DEL SECADO TERMICO	85
<b>6. DESARROLLOS FUTUROS</b>	<b>88</b>
<b>7. PRESUPUESTO</b>	<b>91</b>
<b>8. BIBLIOGRAFIA</b>	<b>93</b>
8.1- DIGESTION ANAEROBIA	93
8.2- SECADO TERMICO	94

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Mercado mayorista de Ambato, Ecuador .....	2
Figura 2: Esquema de reacciones y etapas de la fermentación anaeróbica .....	6
Figura 3: Crecimiento de las bacterias en función de la temperatura.....	9
Figura 4: Digestor discontinuo "Batch" .....	14
Figura 5: Esquema e imagen de un modelo de digestor hindú .....	15
Figura 6: Modelo Chino .....	16
Figura 7: Modelo de digestor familiar de bajo coste o Taiwán.....	17
Figura 8: Imagen exterior del recinto .....	27
Figura 9: Imagen interior del recinto .....	27
Figura 10: Esquema de la instalación diseñada .....	28
Figura 11: Grifo de toma de muestras .....	31
Figura 12: Adaptador de tanque.....	31
Figura 13: Conexión para salida de biogás .....	31
Figura 14: Abrazadera y tubería conectada.....	32
Figura 15: Acople rápido macho.....	32
Figura 16: Imagen final del digestor anaerobio construido .....	33
Figura 17: Gasómetro con principio de desplazamiento de agua.....	35
Figura 18: Taladrado .....	36
Figura 19: Introducción del adaptador en el bidón.....	37
Figura 20: Codo en PVC y manguera transparente .....	37
Figura 21: Imagen final del gasómetro construido .....	38
Figura 22: Gasómetro conectado mediante acople rápido al digestor correspondiente para medir su volumen de biogás .....	38
Figura 23: Esquema explicativo del funcionamiento del gasómetro .....	39
Figura 24: Esquema del gasómetro secuestrador de CO <sub>2</sub> .....	42
Figura 25: Imagen final del gasómetro secuestrador de CO <sub>2</sub> construido .....	43
Figura 26: Agujero cavado para válvula de seguridad .....	44
Figura 28: Imagen de la tubería central.....	45
Figura 27: Válvula de seguridad y tubería principal.....	45
Figura 29: Tubería interior del secuestrador de CO <sub>2</sub> con las piedras difusoras .....	45
Figura 30: Conexión para salida de gas metano al acumulador .....	46
Figura 31: Acumulador de gas .....	47
Figura 32: Sistema de calefacción empleado.....	48
Figura 33: Imagen final de la instalación construida .....	49
Figura 34: Residuos agrícolas utilizados para digestión .....	50
Figura 35: Triturado del residuo orgánico .....	51
Figura 36: Muestras preparadas tras paso por la trituradora .....	51
Figura 37: Ejemplo de instalación de secado térmico directo .....	58
Figura 38: Trómel industrial. Fuente: <a href="http://www.prodesa.net">www.prodesa.net</a> .....	61
Figura 39: Esquema del secador rotativo diseñado y su funcionamiento previsto .....	63
Figura 40: Esqueleto del tromel de secado, formado por tres chapas de metal formando un cilindro y unidas por soldadura.....	64
Figura 41: Unión entre eje central y cilindro interior para asegurar el giro solidario entre ambos .....	65
Figura 42: Detalle de la soldadura entre aspas de metal, eje central y cilindro interior .....	65





Figura 43: Rueda de nivelación del soporte estructural del tromel.....	66
Figura 44: Rodamiento unido al soporte y al eje central de rotación .....	66
Figura 45: Tolva de salida para producto seco .....	67
Figura 46: Sistema motor para giro del tromel.....	68
Figura 47: Imagen final del trómel de secado construido.....	68
Figura 48: Ejemplo de palas internas de volteo .....	69
Figura 49: Esquema del trómel propuesto para redirección del flujo de aire caliente .....	71
Figura 50: Imagen del acumulador lleno de gas el día 20 del experimento .....	72
Figura 51: Evolución de la producción de biogás en el experimento1.....	73
Figura 52: Evolución de la producción de biogás en el experimento 2.....	74
Figura 53: Evolución de la producción de biogás en el experimento 3.....	75
Figura 54: Evolución de la producción de biogás en el experimento 4.....	76
Figura 55: Evolución de la producción media diaria de biogás en los 4 experimentos .....	77
Figura 56: Evolución porcentual en la producción de metano en los 4 experimentos .....	79
Figura 57: Esquema del sistema para medir el poder calorífico inferior .....	81
Figura 58: Imagen del lodo obtenido tras digestión anaerobia y antes de secado .....	85
Figura 59: Bioabono obtenido tras secado térmico (experimento1).....	86
Figura 60: Bioabono obtenido tras secado térmico (experimento 3) .....	87



# INDICE DE TABLAS

---

Tabla 1: Valores de temperatura y TRH óptimos según el rango de trabajo .....	10
Tabla 2: Valores de pH válidos para digestión anaerobia .....	10
Tabla 3: Valores típicos de Sólidos Totales .....	11
Tabla 4: Resumen de parámetros óptimos para digestión anaerobia .....	12
Tabla 5: Composición media del biogás obtenido tras digestión anaerobia .....	18
Tabla 6: Composición del compost obtenido tras digestión anaerobia .....	20
Tabla 7: Distribución final de variables para experimento .....	25
Tabla 8: Contenido en sólidos totales y volátiles de las doce muestras de residuo orgánico .....	53
Tabla 9: Distribución de digestores en la instalación según parámetros .....	55
Tabla 10: Evolución del volumen de biogás y metano durante el experimento 1 .....	73
Tabla 11: Evolución del volumen de biogás y metano durante el experimento 2 .....	74
Tabla 12: Evolución del volumen de biogás y metano durante el experimento 3 .....	75
Tabla 13: Evolución del volumen de biogás y metano durante el experimento 4 .....	76
Tabla 14: Evolución del porcentaje de metano presente en el biogás en los 12 reactores .....	78
Tabla 15: Resumen de valores calculados de capacidad calorífica en los 12 ensayos .....	84
Tabla 16: Valor medio de PCI para los cuatro experimentos .....	84
Tabla 17: Presupuesto para la instalación de digestión anaerobia .....	92
Tabla 18: Presupuesto para la construcción del trómel rotativo .....	92
Tabla 19: Resumen de presupuestos totales para el proyecto .....	92

# 1. INTRODUCCION

## 1.1- MOTIVOS DEL PROYECTO

La idea de llevar a cabo este proyecto surge principalmente del creciente interés en la Universidad Técnica de Ambato (UTA), República del Ecuador, en empezar a investigar en la tecnología de la digestión anaerobia, conocer bien sus efectos, sus ventajas y su funcionamiento e implantar en sus instalaciones un pequeño laboratorio donde se pudiera experimentar y desarrollar esta tecnología.

La digestión anaerobia sí es conocida en Ecuador en algunos sectores, pero está muy pobremente desarrollada y aún tiene un uso muy limitado. El biogás es prácticamente desconocido por la población; en muchos cultivos y granjas solo se utilizan los reactores para producir biofertilizantes, dejando el biogás escapar a la atmósfera. Además durante el proceso no se realiza ningún control sobre temperatura, pH u otras variables que intervienen en la digestión.

Por ello en la UTA, haciendo uso del acuerdo marco existente con la Universidad Carlos III de Madrid, se deseaba recibir una colaboración para poder implantar allí un laboratorio de investigación, con vistas a un desarrollo posterior de una planta de producción de biogás y de pellets en el Ecuador.

Mi motivación personal, por otro lado, era la de finalizar mi formación académica con un proyecto de campo, real en lugar de teórico, que me permitiera además vivir una experiencia en el extranjero y aprender de un país y una cultura tan diferente a la nuestra. El mundo de las energías renovables y en concreto la biomasa siempre me pareció apasionante, pero sobre el papel o en un programa de ordenador es complicado hacerse a la idea del funcionamiento real de esta tecnología. La idea de realizar yo mismo una instalación y experimentar con ella, ver sus dificultades, saber corregir los errores, aprender a resolver inconvenientes que surjan, y además en un país del que ni siquiera me hacía una ligera idea de cómo funcionaba, fueron la motivación necesaria y suficiente para emprender este proyecto.

## 1.2- ANTECEDENTES

La provincia de Tungurahua en la República del Ecuador es una región situada en la cordillera de los Andes a más de 2600 metros por encima del nivel del mar y dominada por la cumbre volcánica del Tungurahua, volcán hoy en día activo y que condiciona toda la vida de la región. A pesar de encontrarse a esa altura sobre el nivel del mar, la latitud ( $S1^{\circ}14'30''$ ) próxima a la línea ecuatorial hace que su capital, Ambato, considerada de clima tropical seco y con temperaturas comprendidas entre los 10 y los 25°C, sea extremadamente feraz y conocida como la "Ciudad de las Flores y de las Frutas", por su fuerte actividad agrícola.

Ambato es una de las localidades de mayor importancia en la economía ecuatoriana, siendo el punto principal de abasto de productos agrícolas de todo el país. Esto implica que cualquier actividad que potencie y mejore este campo, tenga una repercusión importante en otras provincias del país. En la actualidad, en el principal mercado de abastos de la ciudad, el Mercado Mayorista de Ambato, se producen diariamente cientos de toneladas de residuos vegetales que, debido a su tratamiento inadecuado, generan en la zona un importante deterioro medio ambiental. Los residuos orgánicos se descomponen y se pudren debido a factores externos como la luz solar o la temperatura, provocando un fuerte impacto sobre el medio ambiente, contaminando la atmósfera, el suelo y las aguas superficiales y subterráneas, debido principalmente a sus altos contenidos en materia orgánica y elementos minerales, y a la presencia de compuestos orgánicos recalcitrantes, metales pesados, fitotoxinas, patógenos vegetales y animales, los cuales son altamente contaminantes (Cegarra *et al.*, 1994; Vogtmann *et al.*, 1993).

De entre las diferentes alternativas de gestión de los residuos orgánicos conocidas, tanto el depósito en vertederos como la incineración provocan la emisión de CO<sub>2</sub> y de otros gases a la atmósfera, contribuyendo con el efecto invernadero. Resulta por tanto necesario actuar y encontrar una solución a este problema.



Figura 1: Mercado mayorista de Ambato, Ecuador

## 1.3- OBJETIVOS DEL PROYECTO

Dentro de las posibles tecnologías a aplicar para la eliminación de residuos agropecuarios, la digestión anaerobia se plantea como una de las alternativas más prometedoras, habiendo múltiples experiencias al respecto hasta el momento. En países donde la tecnología está más desarrollada, generalmente los estudios realizados van encaminados a la optimización de la producción de biogás, descuidando otros aspectos de valorización como es la producción de compost con los fangos residuales.

El objetivo principal de este proyecto es precisamente el de estudiar las condiciones de digestión anaerobia de los residuos orgánicos del Mercado Mayorista de Ambato para optimizar las condiciones del fango residual con vistas a su compostaje y peletización, sin por ello disminuir la producción de biogás.

El proceso a estudiar en el proyecto propuesto consta de las siguientes partes:

1. Estudio bibliográfico de antecedentes (realizado en España anteriormente a la estancia en Ecuador).
2. Diseño y construcción de una instalación experimental en la Universidad Técnica de Ambato, de manera a poder realizar diversos ensayos ahora y en el futuro para optimizar el proceso.
3. Realizar un primer ensayo de biodigestión en reactores discontinuos de 20 litros, siguiendo el proceso de digestión anaerobia mediante el análisis de pH, Temperatura, volumen de biogás producido, composición del mismo, poder calorífico y contenido en nutrientes del sustrato.
4. Realizar un ensayo de secado de los fangos digeridos mediante la construcción de un secadero rotativo por aire caliente generado por combustión del biogás producido durante la biodigestión.

El proyecto inicialmente iba a tener una duración de cuatro meses, aunque por diversos problemas hubo que dejarlo en tres. Este cambio de planes alteró bastante el diseño inicial de los experimentos, en concreto se decidió reducir la cantidad de variables a analizar simultáneamente de cuatro a dos, de manera a reducir el número de digestores a construir. El resto del proyecto transcurrió según lo previsto.

## 1.4- AYUDA A LA COOPERACION Y AL DESARROLLO

Como ya hemos indicado, la Facultad de Ingeniería Agronómica de la Universidad Técnica de Ambato, y en particular el Ingeniero Octavio Beltrán Villegas estaban interesados desde hacía algún tiempo en la valorización de los residuos agrícolas, en un intento de hacer más sostenible la actividad productiva de la región y disminuir el impacto ambiental de los mismos. Es por ello que en la actualidad están desarrollando una línea de investigación para la mejora del compost y su dosificación, careciendo de experiencia en temas como la digestión anaerobia y el secado térmico de sólidos.

Al ser la dotación económica el principal problema para arrancar con la investigación, se pidió ayuda en forma de beca a la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID) y a la Universidad Carlos III de Madrid (Ayudas para Proyectos de Cooperación al Desarrollo y Movilidad), a lo que ambos respondieron de forma positiva de manera a financiar tanto la estancia en el país como los materiales necesarios para la construcción del laboratorio. Nuestro proyecto además fue elegido en primer lugar en la lista de concesiones por éste último organismo.

Uno de los problemas fundamentales de la República del Ecuador en lo que respecta a Medio Ambiente y Salud Pública es el malo o nulo tratamiento de los residuos orgánicos. Apenas existen plantas de tratamiento de los mismos y en un gran número de poblaciones tan siquiera está resuelto el tema de su retirada y vertido. Esta situación hace que el impacto ambiental de actividades como la producción agrícola industrializada no sea sostenible a medio y largo plazo. A esta situación le añadimos que el uso creciente de agroquímicos en ese tipo de industrias (aumento de la superficie de cultivos en invernaderos, empleo de variedades sensibles, etc.) está provocando un aumento significativo de los mismos en las aguas subterráneas y superficiales. Esto es debido a la ineficiencia de los métodos de dosificación y uso, generalmente por fumigación, que favorece que una gran parte de dichos agroquímicos sean arrastrados fuera de la zona de cultivo.

Los resultados de la investigación propuesta permitirán crear la infraestructura mínima necesaria en la Universidad Técnica de Ambato para el estudio de las condiciones de peletización y compostaje, lo que permitirá a dicha universidad desarrollar proyectos de mejora en la productividad y conservación del Medio Ambiente de la provincia de Tungurahua y por extensión en otras zonas limítrofes.

Este proyecto fue presentado en la feria nacional de ciencia e investigación organizada por la UNESCO y CIENESPE, el día 1 de Diciembre de 2011 en Quito.



## 2. FUNDAMENTOS

### 2.1- DIGESTION ANAEROBIA

La digestión anaerobia es un proceso biológico fermentativo mediante el cual los microorganismos y bacterias presentes en un material biodegradable lo descomponen, en ausencia de oxígeno, eliminando sustancias nocivas y generando biogás durante el proceso. Esta conversión se produce en distintos ambientes, ya sean naturales, como los sedimentos marinos o el sistema gastrointestinal de un ser vivo, o bien en sistemas controlados y creados por el hombre, como los digestores anaerobios.

Cuando se acumula materia orgánica en un ambiente acuoso, actúan primero los microorganismos aerobios alimentándose de éste sustrato y consumiendo el oxígeno que exista en la mezcla. Cuando el oxígeno se agota se producen las condiciones necesarias para que la microbiocenosis anaerobia se desarrolle, consumiendo a su vez la materia orgánica disponible. Como consecuencia del metabolismo de estos microorganismos se genera una importante cantidad de biogás, gas limpio y de capacidad combustible compuesto principalmente por metano y dióxido de carbono, además de un efluente sólido utilizable como abono, libre de patógenos y rico en nutrientes para utilizar en cultivos y un componente líquido o biol muy valorado como fertilizante foliar.

La composición del residuo orgánico condiciona tanto el equilibrio de las poblaciones bacterianas y su eficiencia de depuración, como la configuración del digestor que vamos a utilizar, siendo necesario un contenido elevado en agua y nutrientes y una buena capacidad tampón. Los residuos agropecuarios, es decir residuos vegetales (paja, restos de fruta y hortalizas, etc...) y también animales (excrementos, gallinaza), cumplen esta función y son utilizados hoy en día habitualmente para este proceso de tratamiento de residuos y generación de energía.

El proceso de digestión anaerobia se produce por la acción simultánea y consecutiva de diversos grupos de bacterias heterótrofas, intermediarios directos de la transformación de la materia orgánica residual en dos productos utilizables por el hombre en la industria. Se caracteriza básicamente por cuatro fases diferenciadas en el proceso de degradación del sustrato: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis, interviniendo en cada una distintas poblaciones bacterianas.

## 2. 1. 1 – ETAPAS DE LA DIGESTION ANAEROBIA:

Veamos un esquema y expliquemos más en detalle la actividad de las bacterias que intervienen en el proceso y las distintas etapas del mismo.

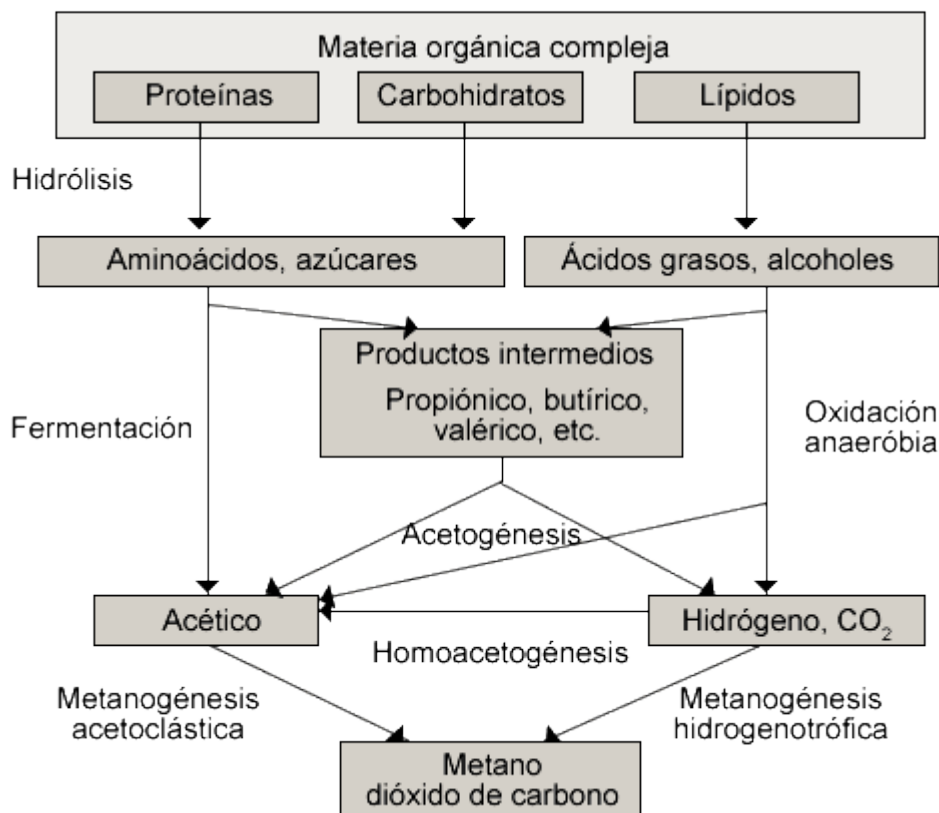


Figura 2: Esquema de reacciones y etapas de la fermentación anaeróbica

Las etapas que se producen durante la digestión anaerobia de residuos orgánicos son las siguientes:

### 1: HIDROLISIS

En esta primera etapa las macromoléculas orgánicas complejas son transformadas en compuestos más simples y de menor tamaño de cadena debido a la acción de bacterias hidrolíticas anaeróbicas. Estas bacterias hidrolizan las moléculas solubles en agua como grasas, proteínas y carbohidratos y las transforman en moléculas más simples, como aminoácidos, ácidos orgánicos y alcoholes. El proceso se lleva a cabo mediante exoenzimas generadas por las bacterias fermentativas

### 2: ACIDOGÉNESIS

En esta etapa las bacterias acidogénicas descomponen las moléculas simples generadas en la etapa anterior en ácidos grasos volátiles (AGV) o de cadena corta.



Estas dos primeras etapas las llevan a cabo bacterias hidrolíticas y acidogénicas. Ambas son facultativas, que pueden consumir el oxígeno molecular presente inicialmente en el sustrato, y estrictas, que no toleran su presencia y ven alterado su crecimiento. Una vez se consume este oxígeno se crea un ambiente idóneo para las bacterias anaeróbicas estrictas, favoreciendo así un rápido crecimiento bacteriano. En estas etapas aún no se consume materia orgánica de manera apreciable, sólo ocurre un acortamiento de cadenas orgánicas.

### 3: ACETOGÉNESIS

En este paso, previo a la generación final de metano, las bacterias acetogénicas metabolizan los productos terminales de la acidogénesis (alcoholes, ácidos grasos) en ácido acético, dióxido de carbono e hidrógeno, que serán el alimento de las bacterias metanogénicas. Las bacterias que intervienen en esta etapa producen acetatos ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) e hidrógeno por medio de la fermentación de azúcares y compuestos mono carbonados.

### 4: METANOGÉNESIS

Por último, las bacterias metanogénicas ya mencionadas producen metano ( $\text{CH}_4$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), dando fin a la degradación. Estas bacterias son anaerobias estrictas, sensibles a los cambios bruscos de temperatura y a la presencia de sustancias inhibidoras; además su crecimiento es cinco veces menor a las anteriores, por lo que serán las limitadoras del proceso de digestión anaerobia y las que más condicionarán las condiciones de trabajo. Distinguimos las bacterias metanogénicas acetoclásticas, que metabolizan el ácido acético, y las metanogénicas hidrogenófilas, que convierten el hidrógeno en biogás.

Los grupos de bacterias descritos se alimentan unas y otras del trabajo de las demás. Las bacterias acidogénicas crean una atmósfera anaerobia en el sustrato, sin la cual las bacterias metanogénicas no podrían reproducirse. Estas a su vez consumen los productos intermedios de las acidogénicas, que de mantenerse crearían unas condiciones tóxicas para estas bacterias, formando por tanto un conjunto simbiótico que hace posible la fermentación anaeróbica.

La naturaleza y composición química del sustrato y los factores ambientales condicionan la composición de la población bacteriana en cada una de las etapas. Como resultado de la actividad de los microorganismos se obtiene biogás y un efluente estabilizado, cuya materia orgánica se compone de moléculas sencillas y sin posibilidad de volver a transformarse en otras moléculas en condiciones ambientales normales. Este efluente se puede aplicar como fertilizante orgánico, pues los nutrientes no son eliminados. Su calidad dependerá del sustrato utilizado inicialmente y del buen desarrollo de la fermentación anaerobia.

## 2. 1. 2 – PARAMETROS OPERACIONALES:

La digestión anaerobia es un proceso sencillo de implementar y de controlar, pero requiere cumplir unas condiciones ambientales y unos parámetros internos para que se desarrolle correctamente. A continuación explicamos los parámetros más influyentes en digestión anaerobia.

### A) TEMPERATURA:

En el proceso de digestión anaerobia las bacterias metanogénicas son, como ya hemos comentado, las que producen el metano en la etapa final del proceso. Existen diferentes poblaciones de bacterias metanogénicas y cada una de ellas requiere una temperatura para trabajar de forma óptima.

Algunas poblaciones tienen su mayor rendimiento a 70°C de temperatura, pero para ello habría que calentar el lodo del interior del biodigestor; otras tienen su rango óptimo de trabajo de 30 a 35°C, temperatura fácilmente obtenible de manera natural en algunas regiones. Al ser los procesos anaerobios generalmente exotérmicos, un buen aislamiento térmico del reactor permite que su temperatura se pueda mantener relativamente alta. En general la actividad de las bacterias descende si estamos por encima o por debajo del rango de temperatura óptimo de trabajo, es decir que se sigue produciendo biogás pero de manera más lenta. A temperaturas inferiores a 4°C en cambio las bacterias quedan “dormidas” e interrumpen la producción de biogás. En general, la mayoría de textos hasta la fecha apuntan un intervalo de 5 a 70°C donde la digestión anaerobia es posible, pero existe una clasificación más precisa con tres rangos de trabajo función del tipo de degradación bacteriana:

- **Rango Psicrofílico:** Temperatura entre 4 y 20°C
- **Rango Mesofílico:** Temperatura entre 20 y 40°C
- **Rango Termofílico:** Temperatura entre 40 y 70°C

Cada uno de estos rangos presenta distintas ventajas e inconvenientes pero los tres son válidos para la biodigestión anaerobia. Normalmente con el aumento de las temperaturas se acelera la actividad metabólica de las bacterias y con ello la velocidad de producción de biogás. Trabajar en el rango termofílico supone una mayor higienización del sustrato digerido, puesto que las bacterias termofílicas se inertizan al enfriar a temperatura ambiente el fango formado, disminuyendo así su patogenicidad. Sin embargo también requiere un mayor control y seguimiento, puesto que a altas temperaturas el nitrógeno amoniacal libre se convierte en inhibidor si éste está presente en gran cantidad en el sustrato, como sería el caso de las excretas de animales.

Cada uno de estos intervalos o rangos de temperatura tienen un alto grado de sensibilidad, es decir la temperatura no puede variar bruscamente durante un tiempo considerado, por ejemplo una hora. El no respetar esta variación máxima horaria provoca que la concentración de ácidos grasos volátiles aumente, el pH y la producción de gas disminuyan rápidamente y las etapas del proceso biológico se desequilibren. Aun así, no se consideran inhibidoras del proceso:

- Rango Psicrofílico:  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  / hora
- Rango Mesofílico:  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  / hora
- Rango Termofílico:  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$  / hora

En biodigestores sin sistema de calefacción depende de la temperatura ambiente que en muchas regiones es inferior al rango de temperaturas óptimas. La fluctuación de temperatura durante el día y la noche no supone un problema grave en plantas construidas bajo tierra, pues a un metro de profundidad la temperatura del suelo es prácticamente constante, pero en otro tipo de plantas exige un control bastante estricto de mantenimiento de temperatura.

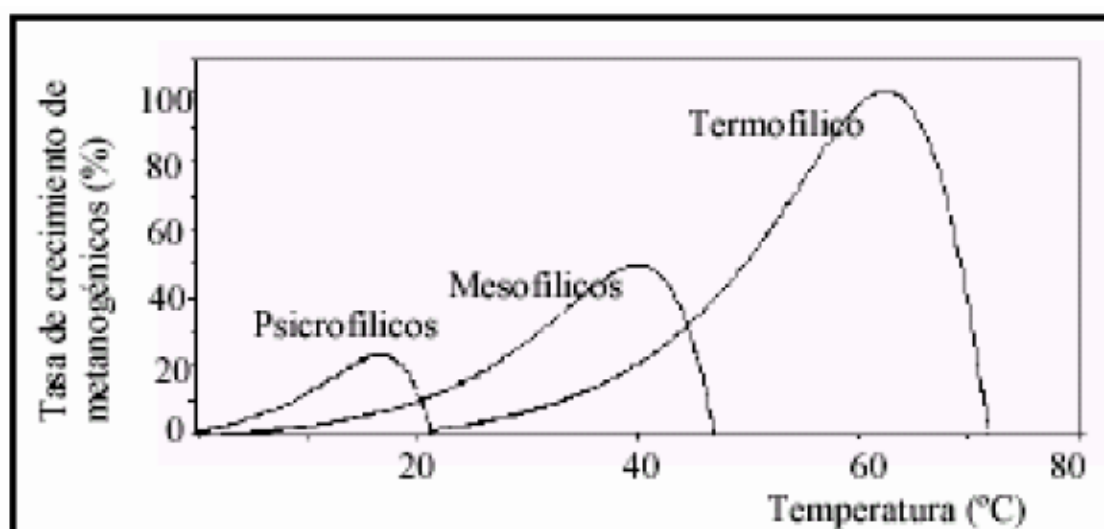


Figura 3: Crecimiento de las bacterias en función de la temperatura

## B) TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICO:

El tiempo de retención hidráulico (TRH) es el tiempo en días que la mezcla residuo-agua permanecerá fermentando dentro del digestor anaerobio, el tiempo que requieren las bacterias para digerir el lodo y producir biogás. Este tiempo depende directamente de la temperatura interna en el reactor, pues como ya hemos indicado esta variable marca la velocidad de crecimiento de las bacterias y por tanto la velocidad del proceso. Así, a menores temperaturas se requiere un

mayor tiempo de retención y viceversa, pues será el tiempo que tomarán las bacterias en digerir el lodo.

Por tanto podemos añadir otra clasificación teniendo en cuenta el TRH necesario según la temperatura de trabajo en el digestor e incluyendo el rango óptimo para la temperatura:

RANGO	T mínima (°C)	T óptima (°C)	T máxima (°C)	TRH (días)
Psicrofílico	4	15 - 18	20	> 100
Mesofílico	20	30 - 35	40	30 - 40
Termofílico	40	50 - 55	70	8 - 15

Tabla 1: Valores de temperatura y TRH óptimos según el rango de trabajo  
Ocaña Pérez-Cerdá, Fr. Javier, "Biodigestor Anaerobio Experimental".

### C) pH:

El pH representa como ya sabemos la acidez o basicidad del medio y depende de la concentración de CO<sub>2</sub> en el gas, de la concentración de ácidos volátiles y de la propia alcalinidad de la materia prima. Se define alcalinidad como la capacidad acido neutralizante de una sustancia en solución acuosa, es decir la capacidad de ésta para mantener su pH estable frente a la adición de un ácido o una base. Cuando no se cumplen valores de alcalinidad cercanos a 2000 - 3000 ppm, se deberá plantear la posibilidad de regular exteriormente el pH del sustrato. Dicho de una manera más sencilla, el pH debe estar en un intervalo preciso, cercano a la neutralidad, de manera que las bacterias se desarrollen de manera favorable.

El valor del pH en el sustrato está muy relacionado con la presencia de ácidos grasos volátiles (AGV) generados en la fase de acidogénesis y que si se acumulan pueden inhibir el proceso de metanogénesis. Las bacterias responsables de este proceso son muy sensibles a cambios de pH fuera del rango 6,2 – 8 y en cambio trabajan óptimamente en torno a 7. Al salir de éste intervalo se genera un medio tóxico para ellas que inhibe el proceso biológico, con el consiguiente aumento en la presencia de AGV (y por tanto el pH disminuirá aún más rápido) y una caída en la producción de gas. A continuación explicamos en una tabla las consecuencias de cualquier cambio de pH en la mezcla:

Rango de pH	Consecuencia en el proceso
6,2 – 6.6	Retarda acidificación
6.6 – 7.6	Intervalo óptimo
7.6 – 8	Retarda amonización

Tabla 2: Valores de pH válidos para digestión anaerobia

## D) SÓLIDOS TOTALES:

Los sólidos totales ST (%) son una expresión porcentual que define la cantidad de materia seca que se introduce en el digestor. La materia orgánica o sólidos volátiles STV (%) se refiere a la parte de éstos sólidos totales que se volatiliza durante la incineración, y es la que contiene los compuestos orgánicos convertibles en metano. Los residuos orgánicos contienen una fracción importante y mayoritaria de agua y otra menor de materia seca, por lo que a la hora de mezclarlos para el sustrato hay que tener en cuenta esta cantidad y calcular entonces el volumen de agua a añadir.

Los requerimientos de operación de un digestor anaerobio establecen que el contenido total de materia seca en la carga no debe exceder el 12%, por esto es necesario diluir los residuos y por ello los mezclamos con agua, pues la mayoría de residuos poseen un valor de sólidos mayor al permitido. A continuación presentamos una tabla con algunos valores de sólidos totales en distintos tipos de sustrato, obtenida de *Bangladesh Biogas Technology* (Tabla 3).

RESIDUO	CONTENIDO SECO (%)	CONTENIDO ACUOSO (%)
Paja de arroz	83	17
Paja de trigo seca	82	18
Tallo de maíz	80	20
Pasto verde	24	76
Excretas humanas	20	80
Excretas de cerdo	18	82
Estiércol de vaca	17	83
Orina humana	0,4	99,6
Orina de cerdo	0,4	99,6
Orina de vaca	0,6	99,4

Tabla 3: Valores típicos de Sólidos Totales

Cuando el contenido en sólidos en suspensión en el efluente resulta excesivo, se produce un aumento de AGV y la producción de gas disminuye.

## E) NUTRIENTES Y RELACION C/N:

Los productos de fermentación se componen de una importante cantidad de nutrientes que son los que hacen el producto utilizable como fertilizante. En su mayor parte se componen de carbono, pero también de otros nutrientes necesarios como nitrógeno, fósforo y potasio. Este parámetro es importante en la biodigestión, pues la proporción de estos nutrientes con respecto al carbono marca el correcto desarrollo de la flora bacteriana. Especialmente importante es la relación carbono/nitrógeno (C/N), siendo ésta la más influyente sobre la producción de biogás.

Cuando las cantidades de nitrógeno son muy elevadas respecto a las de carbono pueden existir problemas de inhibición del proceso debido a la formación de amonio, por lo que se necesita una relación C/N dentro del intervalo 15:1 – 45:1 para un correcto desarrollo del proceso biológico, siendo el valor óptimo de 30:1. Una alta concentración de amonio en el sustrato provoca reducción de pH, aumento de ácidos grasos volátiles y disminución de la producción de gas.

Otros tipos de nutrientes como los ya mencionados fósforo y potasio, azufre, calcio o magnesio también son necesarios pero en menores cantidades. Los sustratos normalmente contienen una cantidad adecuada de estos elementos, pero nunca está demás un análisis químico de nutrientes previo al proceso para evitar concentraciones demasiado altas. La relación C/P, por ejemplo, deberá estar en torno a 150:1.

A continuación añadimos una tabla resumen de los parámetros adecuados para un proceso correcto de digestión anaerobia:

PARAMETRO	RANGO LÍMITE	RANGO OPTIMO
Temperatura	4 – 70°C	30 – 50°C
TRH	15 – 100 días	30 – 60 días
pH	6,2 – 8	6,6 - 7,6
ST (%)	5 – 12	7 – 10
C/N	15:1 - 45:1	30:1

Tabla 4: Resumen de parámetros óptimos para digestión anaerobia

### 2. 1. 3 – VENTAJAS DE LA DIGESTION ANAEROBIA:

La digestión anaerobia es un proceso simple y sencillo de implementar pero que precisa un gran control operacional, la identificación de tóxicos e inhibidores (sulfuros, amonio, metales pesados) y unos intervalos óptimos de parámetros ambientales ya comentados anteriormente para asegurar su correcto funcionamiento. Con todo es un proceso implementado a escala industrial para tratamiento de residuos que tiene un número importante de ventajas que pasamos a explicar:

- Elimina ácidos grasos volátiles y otros compuestos degradables.
- No genera problemas de olores.
- Mantiene las concentraciones de nutrientes y su riqueza fertilizante.
- Homogeneiza la distribución de partículas, lo que facilita posteriores procesos de secado.
- Disminuye la relación de alcalinidad.
- Disminuye la generación de gases de efecto invernadero al servir el metano producido como sustituto de otros gases combustibles contaminantes.
- Reduce la materia orgánica degradable reduciendo la contaminación que supone la descomposición de residuos orgánicos en la atmósfera.
- Es un proceso barato, sencillo de implementar y de resultados probados.
- Balance energético positivo que contribuye a disminuir las necesidades de energía y supone una buena solución para tratamiento de residuos contaminantes.
- Disminuye el potencial contaminante de los residuos de origen animal y vegetal, disminuyendo la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) hasta en un 90% (dependiendo de las condiciones de diseño y operación).
- Permite tratar conjuntamente varios residuos.



## 2.2- DIGESTOR ANAEROBIO

Un digestor anaerobio es un contenedor cerrado herméticamente dentro del cual se produce biogás y abono natural a partir de material orgánico, principalmente excrementos de animales y de humanos y desechos vegetales. Se trata de un sistema sencillo y económico que recicla los residuos orgánicos convirtiéndolos en energía y fertilizante para uso agrícola o industrial, ideal para comunidades rurales y países en vías de desarrollo.

Existen distintos tipos de digestores en función de las necesidades o de la disponibilidad que exista en la región. Una primera clasificación distingue la manera de alimentar el sustrato, pudiendo hacerse de forma continuada o en una sola vez hasta final del proceso.

### 2. 2. 1 - BIODIGESTOR DISCONTINUO:

En estos reactores la carga de la totalidad del material a fermentar se hace al inicio del proceso y su descarga se hace al finalizar el tiempo estipulado. Significa que una vez alimentados y cerrados no permiten extraer o añadir más sustrato hasta que no termine el proceso, es decir, hasta que deje de generarse biogás. Este tipo de digestor admite mayor carga de material poco diluido, por lo que el requerimiento de agua es menor que en los sistemas continuos. Otro aspecto a favor es que no son afectados por presencia de material pesado como tierra o arena. Al principio y al final del proceso la producción de biogás es notablemente menor debido a la carencia de condiciones óptimas para los microorganismos anaeróbicos al inicio y posteriormente al agotamiento de los nutrientes para los mismos. El proceso de digestión se continúa hasta que la producción de gas es tan baja que mantenerlo funcionando es inviable económicamente. Entonces la planta se lava y se rellena de nuevo. Las plantas tipo "Batch" son adecuadas para la digestión de pajas, materiales fibrosos con alto contenido en sólidos, para áreas con pocas lluvias y como uso puramente demostrativo o experimental (Figura 4).

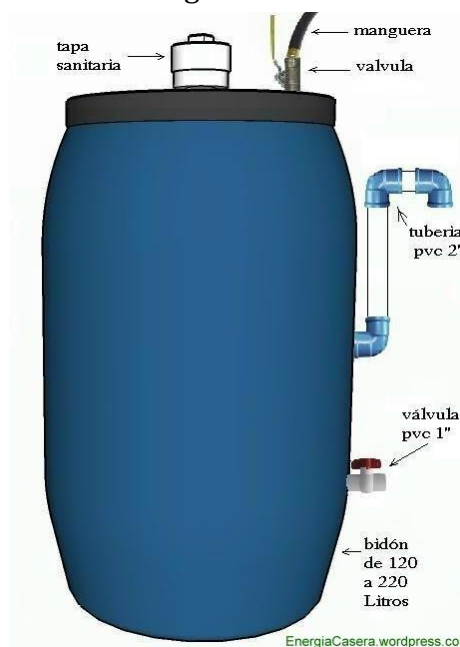


Figura 4: Digestor discontinuo "Batch"



## 2. 2. 2 – BIODIGESTOR CONTINUO:

En este tipo de digestor la carga del material a fermentar y la descarga del efluente se realiza de manera continua o en pequeñas dosis (cada 12, 24 horas, etc.) durante el proceso, es decir que éste no se interrumpe para cargar o descargar el digestor. Tiene la ventaja de no necesitar excesivo mantenimiento y que la producción de gas es constante, por lo que es el más utilizado a nivel industrial. Una pega de este sistema es que la carga añadida de manera periódica se mezcla con el contenido ya presente en la cámara de digestión, por lo que parte del material aún sin degradar sale en el efluente sin eliminar totalmente los agentes tóxicos. Requieren por tanto una mezcla más fluida y un mecanizado mayor en la instalación. Vamos a explicar brevemente los distintos modelos de digestor de flujo continuo conocidos hasta la fecha según su evolución histórica.

### A) MODELO HINDU:

Este modelo aparece en la India en los años cincuenta, y surge de la necesidad de los campesinos de combustible para tractores y calefacción para sus hogares. Se compone de una cámara central de digestión y dos cámaras de carga y descarga comunicadas con la central a través de tuberías. Se le llama también de domo flotante, pues en su parte superior presenta una campana o domo de metal que sube y baja dependiendo del volumen de biogás producido. Esta campana garantiza una presión constante del gas en la cámara de digestión y ayuda a romper la espuma generada durante el proceso. Se obtienen productividades volumétricas de  $0.5$  a  $1 \text{ m}^3$  de biogás/volumen de reactor·día. Hoy en día se sigue utilizando este modelo en muchos lugares del planeta a pesar de la aparición de otros diseños que tienen mayor aceptación.

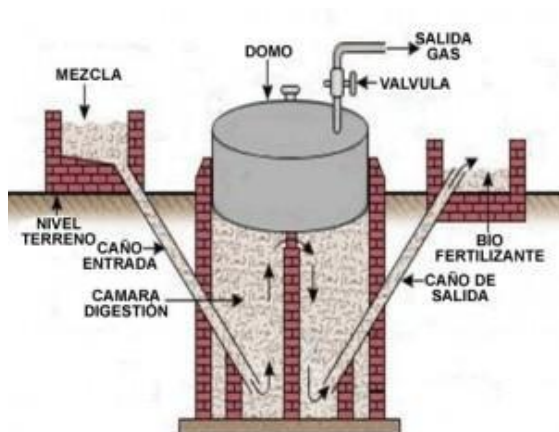


Figura 5: Esquema e imagen de un modelo de digestor hindú

## B) MODELO CHINO:

Tras observar el éxito del modelo de digestor hindú, el gobierno chino decidió adaptar esta tecnología a sus necesidades, que en lugar de ser energéticas eran sanitarias. Este modelo consiste en una estructura de ladrillo u hormigón cerrada y con dos cámaras de carga y descarga en sus laterales, todo construido en una misma unidad. La principal diferencia con el modelo hindú es que la cámara de digestión no tiene campana, sino que es una cúpula cerrada donde se va acumulando el biogás. Al ser esta cámara pequeña se necesita un gasómetro exterior para acumular todo el biogás que se produce. Este modelo tiene una vida útil de unos veinte años, es decir bastante larga, pero a cambio su coste de construcción es bastante alto y lo hace inaccesible para países en vías de desarrollo. Además trabaja con grandes variaciones de presión, lo que reduce la eficiencia de los equipos que trabajan con el biogás producido, y su productividad volumétrica es menor (del orden de  $0.15 - 0.2 \text{ m}^3$  de biogás/volumen de reactor.día).

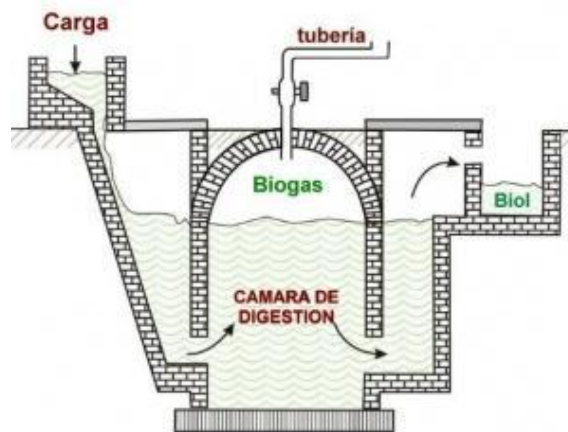


Figura 6: Modelo Chino

## C) MODELO TAIWAN O “DE BOLSA”:

Este modelo también es conocido como “de salchicha” o “familiar de bajo coste”, y es el más popular en países en vías de desarrollo por su bajo costo, fácil instalación y mantenimiento, y por requerir únicamente de materiales locales. Este digestor surge en los años sesenta en Taiwán, debido a que los diseños hasta la fecha suponían un coste excesivo para sus usuarios. El reactor es simplemente una bolsa tubular de polietileno alargada y tumbada en horizontal dentro de una zanja o trinchera cavada en el suelo, en cuyos extremos se sitúan las cámaras de carga y descarga. Su disposición horizontal y alargada impide que la carga líquida inicial y el efluente se mezclen; su funcionamiento es como el de un reactor de flujo pistón no ideal, a diferencia de los casos anteriores que funcionan como reactores de mezcla, y por tanto su rendimiento es mayor. El gas se acumula en la parte

superior de la bolsa, parcialmente llena con biomasa en fermentación; la bolsa se va inflando lentamente con una sobrepresión de operación baja (aproximadamente 0,2 atm), pues no se puede exceder la presión de trabajo de la misma para que no se produzcan roturas en el plástico.



Figura 7: Modelo de digestor familiar de bajo coste o Taiwán

### 2. 2. 3 – BIODIGESTOR DE SEGUNDA Y TERCERA GENERACION:

El digestor de segunda generación se compone de dos partes. Un nivel bajo compuesto por un laberinto de cámaras independientes comunicadas entre sí, donde se retienen temporalmente los materiales con tendencia a flotar. La parte alta, el techo del laberinto, se compone de ranuras y planos en diagonal para permitir la salida del biogás y del compost degradado. Este tipo de digestor permite mezclar la materia orgánica de más lenta digestión con otro material que necesite menos días para degradarse.

El digestor de tercera generación es una mezcla de varios digestores distintos en una sola unidad de tamaño más adecuado, haciéndolo más barato y más práctico. Análogamente al de segunda generación, se compone de un nivel bajo formado por un laberinto de cámaras independientes de carga única y de hasta 30 metros de longitud, similares al sistema “de bolsa”. La parte superior, similar al digestor hindú, es una cámara grande de campana flotante con sus correspondientes zona de carga del material a fermentar y de salida por rebose del efluente biodigerido.

## 2.3- BIOGAS

El biogás es el gas producido por la biodegradación anaeróbica de la materia orgánica. Contiene entre un 50 y un 75% de gas metano ( $\text{CH}_4$ ) y por tanto es un buen combustible que puede ser útil en la generación de energía eléctrica, mecánica y térmica. Puede ser usado para la cocina y también como combustible de motores de combustión interna, aportando potencia mecánica o bien electricidad en el caso de estar acoplado a un alternador o generador eléctrico. Los motores Diesel son una buena alternativa para la generación ya que permiten una mezcla hasta de un 80% de biogás y 20% de diesel. Su poder calorífico está en torno a 16.7 - 25.1 MJ/m<sup>3</sup>, lo que corresponde aproximadamente a la mitad de un litro de combustible diesel. El valor calorífico neto depende de la eficiencia de los quemadores o de su aplicación. La utilización de biogás en equipos comerciales requiere de adaptaciones sencillas para quemarlo eficientemente.

El biogás está llamado a ser una importante fuente de energía, especialmente si consideramos que la producción de combustible a partir de residuos orgánicos es una adecuada forma de reducir el volumen y potencial contaminante de estos.

### 2. 3. 1 – COMPOSICION DEL BIOGAS:

El biogás está compuesto por los siguientes elementos:

ELEMENTO	PORCENTAJE
Metano ( $\text{CH}_4$ )	50 – 80 %
Dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ )	25 – 50 %
Nitrógeno ( $\text{N}_2$ )	0 – 10 %
Sulfuro de hidrogeno ( $\text{H}_2\text{S}$ )	0 – 3 %
Otros (agua, $\text{H}_2$ , oxígeno, CO, $\text{NH}_3$ )	0 – 2 %

Tabla 5: Composición media del biogás obtenido tras digestión anaerobia

### 2. 3. 2 – SUSTRATOS PARA OBTENCION DE BIOGAS:

Los residuos agropecuarios son una fuente ideal para el uso en plantas de obtención de biogás, especialmente los residuos de ganadería. Por otro lado, alrededor de un tercio de los residuos municipales y una parte importante de los residuos industriales contienen materia orgánica y por tanto también son susceptibles de ser utilizados en plantas de digestión anaerobia. En general todos los materiales orgánicos pueden fermentar o ser digeridos, sin embargo, sólo algunos pueden ser utilizados como sustratos en plantas de producción sencillas.



Excremento y orina de vacas, cerdos y aves de corral son los ejemplos más utilizados, pero también ofrecen gran rendimiento los desperdicios de las plantas de producción de alimentos, como paja, restos de frutas y hortalizas, aunque en estos casos hay que seleccionar bien la materia orgánica para no añadir cítricos que acidifiquen la muestra y alteren el pH.

La máxima producción de gas que se puede conseguir a partir de una cantidad dada de materia prima depende del sustrato que se utilice, y su composición influye también en la composición del biogás. Por ejemplo, las grasas producen más metano que las proteínas, y estas últimas más que los carbohidratos. Esto es particularmente importante debido a que un biogás sin un porcentaje de metano cercano al menos al 60% no es un biogás utilizable como combustible.

### 2. 3. 3 - USOS DEL BIOGAS:

Antes de utilizar el biogás se debe conocer su composición en metano y también una propiedad importante, el poder calorífico inferior (PCI) también llamado capacidad calorífica. Este valor indica la capacidad del biogás de generar calor y por tanto de resultar combustible.

El biogás producido en procesos de digestión anaerobia puede tener diferentes usos:

- En calderas para generación de calor o electricidad.
- En motores o turbinas para generar electricidad.
- En pilas de combustible, previa realización de una limpieza de  $H_2S$  y otros contaminantes de las membranas.
- Purificándolo y añadiéndole los aditivos necesarios para introducirlo en una red de gas natural.
- Usándolo como material base para la síntesis de productos de elevado valor agregado como es el metanol o el gas natural licuado.
- Como combustible de automoción.

El biogás, como ya hemos indicado, además de metano contiene otra serie de compuestos que se comportan como impurezas: agua, sulfuro de hidrógeno, monóxido de carbono y compuestos orgánicos volátiles como hidrocarburos halogenados, siloxanos, etc. Por esto puede ser necesaria su limpieza según el uso final que se le vaya a dar.

## 2.4- BIOL Y COMPOST

El segundo producto que se obtiene de la digestión anaerobia de residuos orgánicos se compone a su vez de dos subproductos, uno líquido y uno sólido, ambos con propiedades fertilizantes similares y susceptibles de ser utilizados como abono para plantas y cultivos.

### 2. 4. 1 – BIOL:

El biol es el afluente líquido e inodoro que se encuentra en el reactor al final del proceso de digestión anaerobia. Se suele emplear para abonar tierras y cultivos por sus excelentes propiedades fertilizantes. Aunque siempre se ha considerado un producto secundario con respecto al biogás, actualmente se empieza a considerar de la misma importancia o mayor, especialmente en zonas de fuerte actividad agrícola, pues mejora mucho el rendimiento de las cosechas. Generalmente hay que diluirlo con agua para su aplicación, pues debido a su alta concentración en nutrientes fácilmente disponibles por la planta, puede ser perjudicial para ésta.

### 2. 4. 2 – COMPOST:

El compost, también llamado lodo o biofertilizante es el efluente sólido de la digestión anaerobia, y contiene igual que el biol excelentes propiedades para alimento de tierras y cultivos. Contiene una parte importante de la materia orgánica inicial (el resto se ha transformado en biogás) en forma de compuestos parcialmente oxidados (ácidos orgánicos de cadena corta, ácido húmicos, etc.) y la materia inerte (no biodegradable) presente en la carga del biodigestor. Además, debido a la reacción anaerobia, se encuentra libre de elementos tóxicos, de huevos de helmintos y demás carga contaminante propia de la materia orgánica fecal y de desechos. Este producto es susceptible de ser sometido a secado térmico para obtener pequeñas partículas de producto que faciliten su alimentación al terreno. Su composición varía según el desecho utilizado, pero un promedio de su composición en base seca podría ser el siguiente:

PARAMETRO	VALOR
pH	7,5
Materia Orgánica	85%
Nitrógeno	2,60%
Fósforo	1,50%
Potasio	1%

Tabla 6: Composición del compost obtenido tras digestión anaerobia



La aplicación del efluente al suelo le trae beneficios similares a los que se alcanzan con la mayor parte de los fertilizantes industriales, es decir, actúa como mejorador de las características físicas, facilita la aireación y aumenta la capacidad de retención de humedad y la capacidad de infiltración de agua.

## 3. DESCRIPCION DEL PROYECTO

### 3.1- DISEÑO DEL EXPERIMENTO

Como ya hemos explicado en el apartado de fundamentos teóricos de la digestión anaerobia, existe una gran cantidad de variables con las que se pueden experimentar para conseguir un producto final óptimo. La mayoría de estudios hasta la fecha han hecho especial hincapié en la optimización de producción de biogás, dejando un poco de lado la del biofertilizante. Por ello nos propusimos realizar una digestión anaerobia de residuos vegetales, considerando el fertilizante como producto prioritario y dejando como producto secundario el biogás, no por ello disminuyendo u obviando su producción.

La idea inicial para el primer ensayo en la instalación diseñada era la de experimentar con 4 variables a la vez, véase pH, temperatura, tiempo de retención hidráulica (TRH) y contenido en sólidos del sustrato. Como sabemos estos cuatro parámetros son muy importantes en digestión anaerobia y según unos valores u otros de los mismos los resultados experimentales pueden ser muy diferentes. La idea era por tanto probar con dos valores distintos de cada uno de éstos parámetros, ciñéndonos obviamente al rango de valores óptimos de cada uno, y comparar los resultados después para cada conjunto de variables. Pero esto significaba construir 16 digestores y trabajar con todos ellos a la vez, lo cual, debido al tiempo disponible para realizar el proyecto, resultaba muy arriesgado. Además los tutores de la Universidad Técnica de Ambato proponían, por las costumbres de allí a nivel experimentación, hacer tres repeticiones para cada juego de variables, de manera a contrastar mejor los resultados y por si se producía algún error en alguno. Esto suponía construir 48 digestores, opción absolutamente inviable y que nos obligó a replantear el experimento y el diseño de la instalación.

De manera a respetar la idea de las tres repeticiones experimentales, que además nos pareció absolutamente correcta desde el punto de vista de la validez de los resultados, la opción que nos quedaba era reducir el número de variables del experimento y que éstas fueran probadas posteriormente en la misma instalación pero en ensayos futuros. Reducir una variable suponía igualmente trabajar con un número bastante alto de digestores, por lo que finalmente se redujo a dos variables simultáneas y por tanto a una instalación de 12 reactores. Como pudimos observar durante el desarrollo de la construcción y el experimento, esta decisión fue bien tomada, pues el tiempo del que dispusimos no hubiera permitido otra cosa. A continuación explicamos cómo fue la decisión sobre las variables, cuáles fueron las que eliminamos y el porqué de analizar éstas y no otras.



### 3.1.1 - TEMPERATURA:

La temperatura en digestión anaerobia es un parámetro fundamental, como ya hemos explicado, y la idea inicial era utilizar dos temperaturas diferentes como objeto de estudio. Como ya indicamos anteriormente existen tres rangos diferentes de temperatura para la digestión anaerobia:

- Rango Psicrofílico:  $T = 4 - 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , con  $T$  óptima  $15^{\circ}\text{C}$
- Rango Mesofílico:  $T = 20 - 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , con  $T$  óptima  $35^{\circ}\text{C}$
- Rango Termofílico:  $T = 40 - 65\text{ }^{\circ}\text{C}$ , con  $T$  óptima  $55^{\circ}\text{C}$

El rango mesofílico requiere un TRH (tiempo de retención hidráulico) entrone a 30 días, es más estable y mejor para digestión, y resulta más sencillo pues la temperatura es más parecida a la ambiente. Por otro lado, trabajar en rango termofílico garantiza mejor higienización, mayor eliminación de organismos patógenos en el residuo y mayor descomposición de éstos. Algunos textos consultados recomendaban trabajar en rango termofílico para optimizar el fertilizante, pero debido a que nos pareció que ambos presentaban características y ventajas distintas, se valoró la posibilidad de experimentar con las temperaturas óptimas de cada rango, es decir  $35^{\circ}\text{C}$  y  $55^{\circ}\text{C}$ .

Una vez sobre el terreno, encontramos muchas dificultades para alcanzar temperaturas tan altas sobre el lugar de trabajo, por lo que se descartó la opción de trabajar en el rango termofílico. De hecho, la idea inicial para mantener la temperatura constante era introducir los digestores en una camisa de agua calentada por resistencia eléctrica, pero al ser la instalación tan grande y tras una valoración económica esta idea tuvo que ser descartada. Al ser la temperatura del entorno en el que trabajamos muy cambiante durante el día y teniendo en cuenta que debíamos reducir el número de variables, se optó por trabajar a una temperatura constante de  $35^{\circ}\text{C}$ , es decir la temperatura óptima del rango mesofílico, y posponer la experimentación con temperaturas más altas para futuros experimentos.

### 3.1.2 - TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICO:

El parámetro tiempo de retención hidráulico o TRH es, como ya hemos explicado, el tiempo durante el cual se deja mantener el sustrato, en el interior del biodigestor en condiciones anaeróbicas, hasta alcanzar la digestión. Se pensó usar esta variable para ver las diferencias en producción de fertilizante en función de la duración del proceso, en concreto probar un TRH de 30 días y otro de 15 días. Sin embargo, como ya explicamos anteriormente TRH y temperatura tienen una relación inversa según la cual a mayor temperatura menor TRH es necesario, y además intuíamos que en 15 días a la temperatura de trabajo elegida ( $35^{\circ}\text{C}$ ) la

producción de biogás iba a ser insuficiente. Además, eligiendo un TRH constante e igual a 30 días se podía evaluar igualmente la cinética de producción de biogás a los 15 días, por lo cual esta variable fue el segundo descarte y se optó por un TRH constante e igual a 30 días.

### 3.1.3 – pH:

El pH del sustrato a digerir tras la mezcla entre residuos y agua es otro de los parámetros importantes para una buena digestión anaerobia. Como indicamos existe un rango de pH bastante estricto (6,2 - 8) fuera del cual se produce una inhibición del crecimiento microbiano y una mala digestión. Esto implica un seguimiento continuo del pH del sustrato y una acción inmediata ante un descenso importante. La mejor solución tampón o al menos la más recomendada en la actualidad para control de alcalinidad es el bicarbonato sódico, aunque nosotros utilizamos cal lechosa (disolución de hidróxido cálcico) con buenos resultados, dado su mayor accesibilidad y menor coste.

El pH nos pareció un parámetro lo suficientemente importante como para analizar su influencia en la digestión; un pH ligeramente ácido retrasa la etapa de acidificación, mientras que uno ligeramente básico retrasa la amonización. Algunos autores consultados recomiendan un pH ligeramente ácido para la mejor nitrificación del abono, pero otros lo prefieren ligeramente básico. Ante estas diferencias de opinión consultadas se decidió probar ambas situaciones para poder comparar, y decidimos experimentar con los siguientes valores de pH:

$$\text{pH}_1 = 6.7 \quad \text{pH}_2 = 7.3$$

Durante el proceso de digestión el pH de la mezcla tiende a disminuir de manera importante durante la etapa de acidogénesis. Por ello ideamos un sistema, explicado con más detalle más adelante (*apartado 3.3.3*), para añadir la cal a la mezcla sin entrada de oxígeno en el tanque ni proyección de gas al exterior.

El control y mantenimiento de pH constante fue una de las actividades más costosas en tiempo de todo el proyecto. Cada día era necesario tomar una medida en cada tanque, por medio de una llave de bola colocada en la base, y añadir cal lechosa en caso de descenso de pH. Al tomar una muestra y ver que el pH había variado, añadíamos la cal poco a poco, tomando otra muestra después de cada adición, de manera a recuperar el pH deseado. Tras añadir la cal agitamos el digester manualmente para que la mezcla se homogeneice. Después de repetir este proceso varias veces era más sencillo saber cuánta cantidad de cal se debía añadir, pero las primeras veces había que tener mucho cuidado pues una adición excesiva puede provocar un aumento excesivo del pH. Otro problema importante suele ser el bloqueo de las llaves de toma de muestras por partículas sólidas del sustrato;

esto provoca que al desatascarse la válvula, la muestra que sale y que medimos con el pH-metro es diferente al resto de la mezcla del bidón, lo que puede inducirnos a error en la decisión de añadir o no cal lechosa para variar el pH.

Como la cal es barata y bastante sencilla de conseguir, se recomienda practicar antes con un sustrato idéntico al contenido en los bidones pero en una cubeta aparte, de manera a hacerse una idea aproximada de las cantidades de cal a añadir en función de la variación de pH deseada.

### 3. 1. 4 – SÓLIDOS TOTALES:

La última variable que se analizó en nuestro proyecto fueron los sólidos totales, medida expresada en porcentaje y que básicamente indica la cantidad real de materia sólida presente en la mezcla, o el porcentaje de sólido en el sustrato con respecto al agua. Según la bibliografía consultada los límites para sólidos totales para muchos autores están entre el 5 y el 12%. Algunos recomiendan que en el caso de residuos vegetales las cantidades sean más altas, otros opinan que siempre debe ser menor al 10% y por último según experimentos de la Universidad de Chapingo en 2001, para un abono más rico en nutrientes se debe tener un valor de ST en torno al 12%.

Debido a esta disparidad en las opiniones consultadas consideramos interesante usar este parámetro como variable, y la decisión, contrastando dichas opiniones, fue experimentar con los siguientes valores de sólidos totales:

$$ST_1 = 7\% \quad ST_2 = 11\%$$

De esta forma tenemos dos valores cercanos a los límites recomendados y a su vez distantes entre ellos. Más adelante explicaremos la manera de calcular los sólidos totales para las diferentes mezclas.

### 3. 1. 5 – PORCENTAJE DE MATERIA ANIMAL Y VEGETAL:

Esta variable básicamente supone introducir en el sustrato una mezcla de materia animal (estiércol) y materia vegetal. Se planteó también como posibilidad pero se consideró que lo realmente importante para este proyecto era experimentar con residuos del mercado de abastos, y éstos eran únicamente vegetales; por ello se decidió probar con materia animal en futuros ensayos y en éste proyecto ceñirse únicamente a residuos agrícolas.

Parámetro	Tipo	Valor 1	Valor 2	Valor
<b>pH</b>	variable	<b>6,7</b>	<b>7,3</b>	
<b>ST</b>	variable	<b>7%</b>	<b>11%</b>	
<b>TRH</b>	constante			<b>30 días</b>
<b>T</b>	constante			<b>35°C</b>

Tabla 7: Distribución final de variables para experimento

## 3.2- DISEÑO DE LA INSTALACION

La instalación ideada para este proyecto se compone de 12 biodigestores para experimentar con distintas variables a la vez, un acumulador de biogás y una máquina secadora rotativa para secado del fertilizante, además de dos aparatos para medidas de volumen. Durante su diseño, previo al montaje, tuvimos que afrontar muchas dudas acerca del espacio a ocupar, el mejor terreno para la instalación, cómo disponer los reactores para facilitar el proceso y los análisis, etc.

### 3.2.1 - ELECCION DEL TERRENO:

La idea inicial era instalar todo el montaje en un laboratorio cerrado, pues los antecedentes estudiados indicaban que un espacio cerrado daba buenos resultados. Sin embargo, las instalaciones de la Facultad de Agronomía en la UTA no disponían de un espacio cerrado tan grande como para acoger la instalación que teníamos en mente, principalmente por el espacio que posiblemente ocuparía la máquina secadora. Al disponer la universidad de distintos invernaderos no ocupados en sus instalaciones exteriores, se pensó en la posibilidad de utilizar una porción de uno de ellos de 5 x 5 metros, cerrado mediante una malla plástica y cubierto en el techo para evitar la entrada de agua, frío y humedad.

Resultó para la elección del terreno principalmente importante considerar las condiciones climatológicas de la zona, que afortunadamente eran bastante repetitivas y regulares. Durante el día solía haber sol y unos 25°C de máxima, mientras que de noche podía llegarse a los 7°C, con numerosas tardes de lluvia. Utilizar un invernadero nos presentaba ventajas e inconvenientes con respecto a utilizar un laboratorio que tuvimos que valorar antes de decidir:

#### **VENTAJAS:**

- Alta temperatura de trabajo durante horas de sol (Media de 35°C).
- Espacio para trabajar más amplio.
- Posibilidad de ampliación de la instalación.

#### **INCONVENIENTES:**

- Temperaturas excesivas a algunas horas del día (45°C).
- Temperaturas muy bajas durante la noche (7°C).
- Demasiado polvo, problema para la salud.
- Humedad importante en días lluviosos.

La decisión final fue instalar el laboratorio en un invernadero, buscando soluciones para los inconvenientes que tenía trabajar en este terreno:

- Aperturas laterales a modo de ventana de aireación en la malla de plástico para controlar los excesos de temperatura y que ésta no superara los 40°C.
- Implantación de un sistema de calefacción para que la temperatura nocturna no bajara de los 20°C y así no se viera inhibido el proceso.
- Cerrar bien el recinto para evitar la entrada de agua.
- Uso de mascarillas para el polvo, o si el trabajo de construcción a realizar lo permitía, desarrollar éste fuera del recinto.



*Figura 8: Imagen exterior del recinto*



*Figura 9: Imagen interior del recinto*



### 3. 2. 2 – ESQUEMA DE LA INSTALACION:

Otro problema a resolver que surgió sobre la marcha era de qué manera colocar físicamente los 12 reactores para que no hubiera problemas a la hora de manipularlos, tomar medidas o simplemente no tropezar con alguna tubería. Los elementos a tener en cuenta eran los siguientes:

- Facilidad de maniobra para toma de medidas.
- Evitar tuberías cruzadas.
- El sistema de calefacción debe aportar el mismo calor a los 12 reactores.
- El acumulador de gas bien situado con respecto al trómel y a los digestores.
- Tuberías suficientemente largas para poder remover manualmente los bidones sin dañar las conexiones, pero no tanto como para que se produzcan pérdidas de gas.

La primera idea de diseño fue con los reactores en fila, de manera a ocupar el menor espacio posible. Sin embargo con este sistema los calefactores calentaban más unos digestores que otros, falseando entonces la igualdad de condiciones en los reactores en cuanto a temperatura. Con el trascurso de la construcción nos dimos cuenta que la idea inicial dificultaba mucho la toma de medidas y además desaprovechábamos mucho espacio del que disponíamos.

La decisión final fue una instalación en círculo, de manera que todos los digestores estuvieran a la misma distancia de los calefactores; la tubería central que une los 12 reactores sería interna a la circunferencia, mientras que las mangueras de salida para toma de medidas irían hacia el exterior para facilitar las conexiones con los aparatos medidores. (Figura 10)

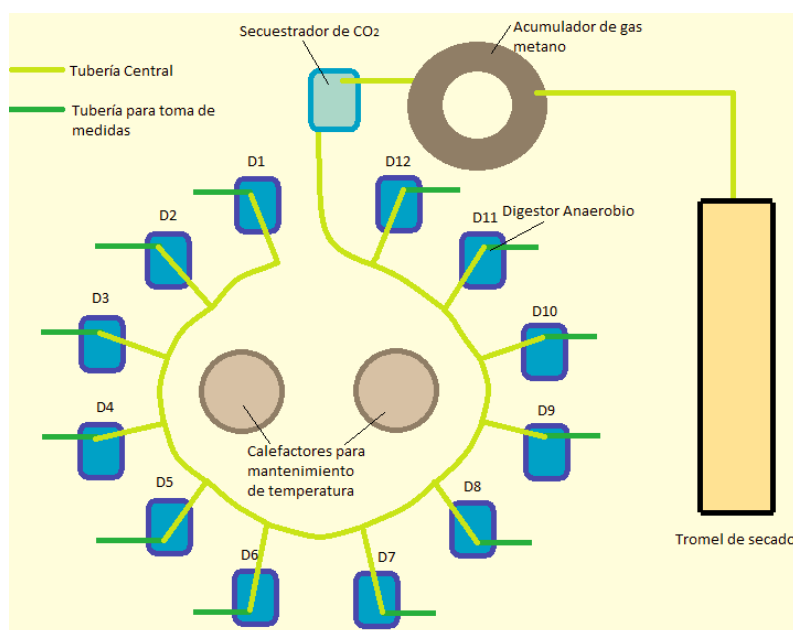


Figura 10: Esquema de la instalación diseñada

### 3.3- CONSTRUCCION DE UN DIGESTOR BATCH

Existen como comentamos anteriormente muchos tipos de digestores, de diversas formas, tamaños y materiales. Para nuestro proyecto la idea era construir un digestor lo más sencillo posible y con materiales básicos de construcción, de manera a ajustar el presupuesto lo mejor posible y demostrar que se puede construir algo útil sin una gran cantidad de recursos.

Por ello la idea es utilizar un bidón de plástico de capacidad 20 litros, más que suficiente para los experimentos que se llevarán a cabo sobre ellos y con la resistencia suficiente para la presión de gas producida. En este apartado explicamos los materiales necesarios para la construcción y el paso a paso de la misma.

#### 3. 3. 1 - MATERIALES Y HERRAMIENTAS UTILIZADOS:

Exponemos a continuación la lista de materiales utilizados para construir un solo digestor anaerobio; la instalación se compone de 12 reactores, pero sólo especificaremos los materiales necesarios para construir una unidad:

- 1 Bidón de plástico de 20 litros con tapón hermético
- 1 Llave plástica de bola de  $\frac{1}{2}$ " para toma de muestras
- 2 Adaptadores de tanque de  $\frac{1}{2}$ "
- 2 Llaves de paso en PVC de  $\frac{1}{2}$ " para salida de biogás
- 2 Llaves de paso en PVC de  $\frac{1}{2}$ " para alimentación de cal lechosa
- 1 Unión Flex macho de plástico de  $\frac{1}{2}$ " y de 10 cm para alimentación de cal
- 3 Unión Flex macho de plástico de  $\frac{1}{2}$ " y de mínima longitud
- 3 Neplo Flex macho de plástico de  $\frac{1}{2}$ " para salida a tubería
- 1 T en PVC hembra de  $\frac{1}{2}$ "
- 1 T en PVC macho de  $\frac{1}{2}$ " para conexión con la tubería central
- 1 metro de tubería o manguera de jardín de  $\frac{1}{2}$ "
- 3 Abrazaderas de aluminio de  $\frac{1}{2}$ "
- 1 Conexión reductora metálica de  $\frac{1}{2}$ " a  $\frac{3}{4}$ "
- 1 Acople rápido macho metálico de  $\frac{3}{4}$ "
- Teflón para evitar fugas de gas en uniones roscadas
- Silicona para tapar posibles fugas de gas
- Pegamento epoxi para plástico
- 1 Taladro
- 1 Cúter
- Papel de lija

### 3. 3. 2 – CONSIDERACIONES:

Debido a las intenciones que tenemos para nuestro proyecto, el digestor que pretendemos construir tiene básicamente tres consideraciones a tener en cuenta, que tal vez para un proyecto diferente no serían iguales:

- Necesitamos una toma de muestra diaria del sustrato contenido en cada reactor de manera a controlar el pH y la temperatura de la mezcla, por lo que debemos colocar un grifo o válvula de salida situado cerca de la base del bidón, permanentemente en contacto con el sustrato.
- En caso de variación del pH, necesitamos poder añadir cal lechosa para regular su valor. Es importante para este cometido que la adición de cal se produzca sin que penetre oxígeno dentro del reactor, pues esto afectaría al proceso anaerobio. Además al contener gas en su interior, ante una adición sin cuidado de cualquier producto químico se podría producir una proyección del mismo hacia afuera. Por eso diseñamos un sistema con doble llave de paso, de manera a introducir primero la solución en un tubo de 10 cm, cerrar la primera llave y después abrir la segunda para que la cal lechosa se vierta al sustrato sin pérdidas de gas ni entrada de oxígeno.
- Necesitamos una salida de gas hacia el acumulador principal, pero también una salida para la toma de medidas de volumen, distinta para cada reactor. Por ello utilizamos una salida de gas en forma de T con dos llaves, de manera que una salida conecte a la tubería principal y la otra a una tubería que termina en conexión acople rápido para conectar con el gasómetro medidor de volumen.

### 3. 3. 3 – CONSTRUCCION PASO A PASO:

Estas son las etapas de la construcción de nuestro digestor anaerobio:

**Paso 1:** Partimos de un bidón de plástico de 20 litros al que tenemos que realizar tres agujeros con el taladro. El primer agujero contendrá la válvula para toma de muestras, con lo cual deberá estar situado cerca de la base y en la zona central del tanque, para que esté en contacto con la mezcla sólido – agua. El segundo y el tercer agujero serán para la salida de gas y la alimentación de cal. Ambos deben estar situados en la parte de arriba del bidón para facilitar las maniobras y la salida del biogás.

En nuestro caso, debido a lo estrecho del agujero de alimentación y por comodidad a la hora de colocar los adaptadores de tanque haremos uno de los agujeros en la tapa hermética del bidón.



**Paso 2:** Colocamos la válvula de bola para toma de muestras, más o menos a 1/4 del total del recipiente desde la base. Tras lijar la zona entorno al agujero taladrado, aplicamos una capa de pegamento epoxi para plásticos, esperamos a su secado y comprobamos que esté bien pegado. Es importante aplicar silicona entorno a la base de la válvula, ya que según el gas se va generando el bidón se hincha produciendo huecos en los contactos por los que el sustrato puede derramarse.



*Figura 11: Grifo de toma de muestras*

**Paso 3:** Ahora debemos colocar los adaptadores de tanque en los dos agujeros de la parte superior del tanque. Debido a la estrechez del agujero de alimentación no se puede introducir la mano para roscar las partes macho y hembra del adaptador. Utilizamos un alambre rígido pero maleable o una cuerda para introducir la parte macho dentro del bidón hasta que su parte roscada pueda sacarse por el agujero taladrado. Después enroscamos la parte hembra con fuerza para que el adaptador quede perfectamente unido al bidón. Añadimos igualmente una capa de silicona alrededor para evitar cualquier posible escape de gas.



*Figura 12: Adaptador de tanque*

**Paso 4:** Procedemos a hacer el conexionado de la salida de biogás. Este conjunto está compuesto por una T, tres uniones Flex, dos llaves de bola y dos Neplo-flex, todos ellos de 1/2". Es importante añadir teflón a todas las roscas para asegurar que no haya escape de gas a través de ellas. Este montaje es sencillo y viene ilustrado en la *Figura 13*.



*Figura 13: Conexionado para salida de biogás*

**Paso 5:** En los dos neploflex negros colocados en el conexionado anterior añadimos la manguera con una abrazadera para que no exista escape de gas. Facilita mucho el trabajo meter en agua hirviendo el extremo de manguera donde se va a introducir el neploflex, de manera a ablandarla y facilitar su entrada. Conviene asegurarse de que la abrazadera quede bien apretada.



*Figura 14: Abrazadera y tubería conectada*

**Paso 6:** En uno de los extremos de la manguera vamos a montar un sistema para poder tomar las medidas de volumen. Si sólo tuviéramos un digestor, se podría acoplar directamente éste al gasómetro y por tanto este paso no sería necesario, pero al tener 12 reactores y un solo aparato de medida el sistema que utilizamos es un acople rápido macho que actuará con la hembra presente en el aparato medidor. De esta forma cada vez que necesitamos medir el gas en un reactor basta con conectar ambos acoples y abrir la llave correspondiente. El sistema asegura una perfecta conexión entre los acoples macho y hembra, sin pérdidas de gas a la atmósfera. Debido a que no encontramos acoples rápidos de  $\frac{1}{2}$ ", fue necesario añadir un reductor de  $\frac{1}{2}$ " a  $\frac{3}{4}$ " en el extremo de la manguera.



*Figura 15: Acople rápido macho*

La manguera en este extremo debe ser como mínimo de medio metro de longitud, para facilitar su uso a la hora de tomar las medidas.

**Paso 7:** La manguera del otro extremo del conexionado será la que irá conectada a una tubería principal, donde van unidos el resto de reactores y que termina en el acumulador de biogás. Pero antes habrá que añadir una T de  $\frac{1}{2}$ " al final de la manguera para más tarde conectar en ella una botella válvula de seguridad, medida preventiva ante subidas bruscas de presión. Añadimos igualmente una abrazadera para evitar fugas de gas. Este paso sólo es necesario debido a la cantidad de digestores con los que estamos trabajando.

**Paso 8:** Por último montamos el sistema de doble llave para el añadido de cal lechosa al sustrato. Para esto contamos con dos llaves de bola y una unión Flex de 10 cm de manera que haya espacio suficiente para añadir una buena cantidad de

solución, además del adaptador de tanque que ya colocamos en el tapón hermético. La unión Flex utilizada permite añadir 20 ml de cal. No olvidar una vez más añadir teflón en las partes roscadas.



Figura 16: Imagen final del digester anaerobio construido

### 3. 3. 4 – CONSEJOS CONSTRUCTIVOS:

Aunque ya hemos indicado algunos consejos prácticos durante la construcción paso a paso, conviene hacer hincapié en ellos y añadir otros para no cometer errores y obtener una buena digestión:

- Aplicar teflón en todas las uniones roscadas para impedir fugas de gas.
- Las abrazaderas o arandelas de hule son fundamentales en las uniones tubería – neploflex, sobre todo ante subidas de presión de gas la tubería puede soltarse y el proceso quedar interrumpido.
- Preparar bien las zonas donde se va a aplicar pegamento o silicona, con papel de lija, ya que sobre todo tras taladrar quedan impurezas y la zona deteriorada.
- Aplicar agua con jabón en las uniones señaladas para detectar posibles fugas de gas durante el proceso e intervenir a tiempo.
- Una vez el digester construido llenarlo de agua y comprobar que no hay fugas de agua a través de las conexiones, en especial la válvula para toma de muestras.
- Para detectar fugas se puede utilizar un compresor de aire que aplique presión dentro del digester y así corregirlas antes de arrancar el proceso.

### 3.3.5 – POSIBLES MEJORAS CONSTRUCTIVAS:

Una vez terminado el proyecto y visto el funcionamiento de la instalación, conviene añadir unos consejos para trabajos futuros en algunos detalles que sería posible mejorar para el rendimiento de los digestores:

- Conviene colocar en las válvulas de toma de muestras una malla interior que sólo deje pasar líquido, pues debido a los sólidos presentes en el sustrato a veces los grifos se bloquean y resulta complicado tomar muestras válidas para medidas de pH.
- Si fuera posible, añadir un agitador interno a los digestores. Esto complica la construcción pero facilita la homogeneidad de la mezcla; nuestro sistema para mantener la mezcla homogénea era la agitación manual, que obviamente era menos efectiva.

## 3.4- MEDIDORES DE VOLUMEN DE BIOGAS Y METANO

Uno de los análisis más importantes de este proyecto es, en función de las distintas variables estudiadas en los digestores, la cantidad de gas que se genera diariamente y su porcentaje de metano, elemento realmente importante a la hora de utilizar el biogás como combustible. Por ello construimos dos gasómetros simples de construir y sencillos de manejar, de manera a poder utilizarlos diariamente en las mediciones de los distintos reactores del experimento, saber cuánto gas se está generando, saber su contenido en metano y dióxido de carbono y poder reutilizar el gas posteriormente.

Ambos sistemas diseñados se basan en el gasómetro proporcionado en el Proyecto Fin de Carrera de Francisco Urieta Aguado, *“Diseño y construcción de un sistema ORSAT modificado para el análisis de biogás”*, de diciembre de 2010. Responden al principio de desplazamiento de agua. En nuestro caso, debido a la mayor dificultad de encontrar materiales y el presupuesto limitado que disponemos es solo una versión más simple y sencilla de construir, no por ello menos útil o válida para mediciones.

### 3.4.1 – MEDIDOR DE VOLUMEN DE BIOGAS:

La intención para este proyecto es medir con la mayor frecuencia posible la cantidad de biogás que se produce en cada reactor, de manera a comparar, según las variables que cada uno tenga, la producción diaria de gas. Además, para perder la menor cantidad posible de gas durante cada medida, añadiremos un sistema para poder usarlo tras cada acumulación y así medir su capacidad calorífica.

El esquema propuesto y del que partimos es el siguiente:



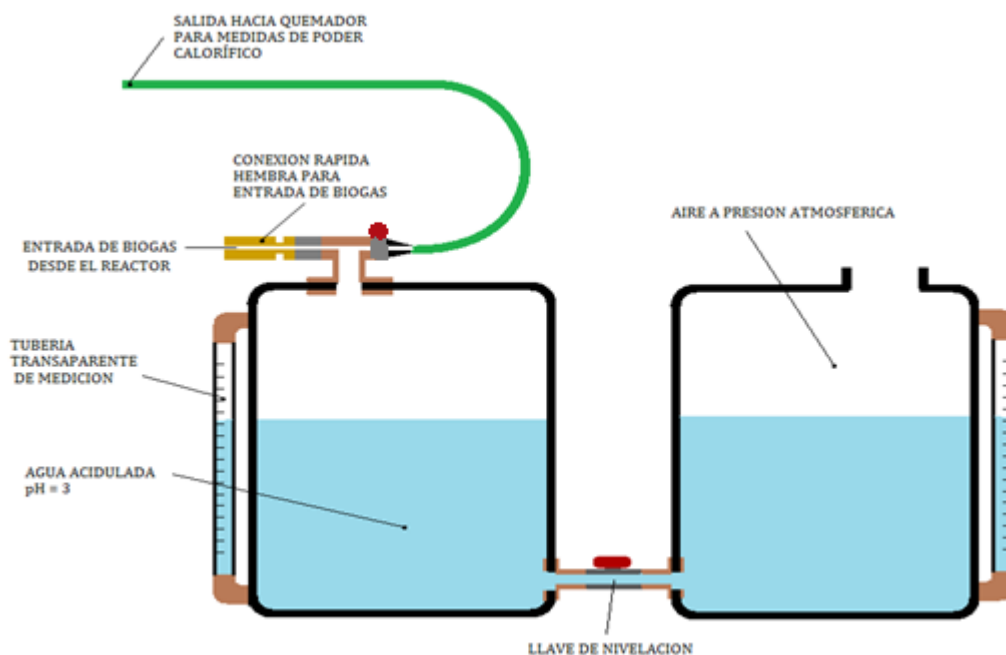


Figura 17: Gasómetro con principio de desplazamiento de agua.

#### A) FUNCIONAMIENTO:

Como vemos en la *Figura 17* utilizamos dos bidones de agua, iguales a los que utilizamos para los digestores, conectados por una llave de nivelación. El sistema es sencillo, el gas entra desde el reactor elegido en el primer bidón, desplazando el agua contenida en el mismo y generando un desnivel que medimos en el segundo bidón. Esto nos da la medida del volumen de gas que se está generando en el tiempo que consideremos oportuno. Conviene no demorar el tiempo de medida más de 30 minutos pues se pueden producir fugas de gas y falsear los resultados. Una vez comience a producirse gas y comience a llenarse el depósito de almacenamiento, este gas irá empujando el agua, haciendo que ésta ascienda en el bidón colocado en paralelo. De este modo, y conociendo las medidas del bidón depósito, podremos determinar, por la altura de agua desplazada, el volumen de gas que se ha producido durante el tiempo que hayamos dejado.

Es importante acidular ligeramente el agua mediante alguna solución de ácido clorhídrico (HCl) o sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), de manera a evitar que el gas carbónico sea absorbido con el agua. No existe una cantidad concreta de ácido a añadir, simplemente basta con comprobar que el pH tras adición está en torno a 3 - 4.

## B) MATERIALES Y HERRAMIENTAS UTILIZADOS:

- 2 Bidones de plástico de 20 litros con tapón hermético
- 7 Adaptadores de tanque de  $\frac{1}{2}$ "
- 1 Llave de paso en PVC de  $\frac{1}{2}$ " para salida de biogás
- 1 Llave de paso en PVC de  $\frac{1}{2}$ " para nivelación del agua
- 1 Neplo Flex macho de plástico de  $\frac{1}{2}$ " para salida a tubería
- 2 Unión Flex macho de plástico de  $\frac{1}{2}$ "
- 1 T en PVC hembra de  $\frac{1}{2}$ "
- 4 Codos de PVC de  $\frac{3}{4}$ " y de 90°
- 2 Fragmentos de tubería transparente de  $\frac{3}{4}$ "
- 4 Abrazaderas de aluminio de  $\frac{3}{4}$ "
- 1 Conexión reductora metálica de  $\frac{1}{2}$ " a  $\frac{3}{4}$ "
- 1 Acople rápido hembra metálico de  $\frac{3}{4}$ "
- Ácido Clorhídrico (HCl) o Sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) al 5%
- Teflón
- Silicona
- Pegamento epoxi para plástico
- 1 Taladro
- 1 Cúter
- Papel de lija

## C) CONSTRUCCION PASO A PASO:

**Paso 1:** En el bidón 2 realizamos los siguientes tres agujeros mediante taladro:

- Uno centrado y cerca de la base para la llave de nivelación.
- Dos en cualquiera de las superficies laterales, en este caso la más cómoda es la opuesta a aquella donde se taladró el primer agujero. Estos dos agujeros son para sujeción de la manguera de nivel, con lo cual deben estar situados a la altura correcta y bien alineados.



Figura 18: Taladrado

En el bidón 1 realizamos los mismos agujeros y uno más, en la superficie superior, para el sistema de entrada y salida de gas que usaremos para medir el PCI del biogás.



**Paso 2:** Colocamos los adaptadores de tanque en los agujeros taladrados en cada tanque. Utilizamos, análogamente a lo explicado en 3.3.3, un alambre rígido pero maleable o una cuerda para introducir la parte macho dentro del bidón hasta que su parte roscada pueda sacarse por el agujero taladrado. Añadimos después una capa de silicona alrededor para evitar escapes de agua.



Figura 19: Introducción del adaptador en el bidón

**Paso 3:** Unimos directamente sobre la rosca que sobresale del adaptador los codos de 90° por un extremo, y por el otro colocamos la tubería transparente, sin olvidar añadir una abrazadera en cada conexión para evitar fugas de agua. Conviene tras acabar este paso llenar el bidón de agua para comprobar que no haya fugas, y en caso de que las hubiere apretar mejor la abrazadera y aplicar silicona en la unión.



Figura 20: Codo en PVC y manguera transparente

Este paso es común a ambos bidones.

**Paso 4:** Procedemos a hacer el conexionado de la entrada del biogás que vamos a medir. Este conjunto es idéntico al que explicamos para la construcción del biodigestor (Figura 13) con la salvedad que en uno de los extremos reemplazamos la llave de paso por un reductor de  $\frac{1}{2}$ " a  $\frac{3}{4}$ " y su correspondiente acople rápido hembra. Es importante añadir teflón a todas las roscas para asegurar que no haya escape de gas a través de ellas. Por último, acoplamos en el neploflex del otro extremo del conexionado una tubería que servirá para medidas de capacidad calorífica. No olvidar la abrazadera correspondiente.

Este paso sólo se realiza en el bidón 1.

Nota importante: Recordamos que estos cambios de medidas de  $\frac{1}{2}$ " a  $\frac{3}{4}$ " fueron obligados debido a no encontrar acoples rápidos de  $\frac{1}{2}$ ", pero en absoluto es obligatorio para el buen funcionamiento del montaje.

**Paso 5:** Unimos ambos bidones mediante la llave de nivelación (Figura 21).



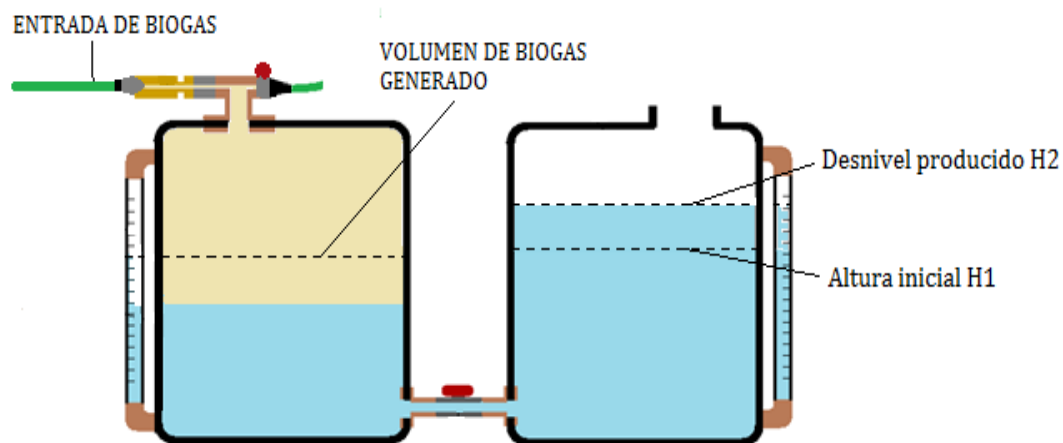
Figura 21: Imagen final del gasómetro construido



Figura 22: Gasómetro conectado mediante acople rápido al digester correspondiente para medir su volumen de biogás

## D) MODO DE EMPLEO:

1. Realizamos una marca con bolígrafo en la tubería transparente del bidón 2, indicando el nivel inicial de agua en el mismo antes de que entre biogás.
2. Abrimos el tapón hermético del bidón 2 para que el agua de ese bidón esté a presión atmosférica.
3. Conectamos mediante el sistema acople rápido el gasómetro al reactor en que deseamos medir y cerramos en éste último la llave de paso al acumulador principal (Figura 22).
4. Abrimos la llave de paso del digestor que permite que el biogás entre al gasómetro y empezamos a medir el tiempo. Conviene dejar escapar un poco de gas durante unos segundos sin que afecte a la medida, pues la subida inicial debido a la presión es muy alta y los resultados pueden ser falseados. Además pueden existir restos de aire en los conductos que falsean tanto la proporción de metano como el poder calorífico inferior del biogás.
5. Dejamos durante el tiempo que estimemos oportuno (recomendable 15-20 minutos) que el gas penetre en el bidón, y observamos que el agua comienza a desnivelarse por la presión que el gas ejerce sobre ella.
6. Cuando se cumpla el tiempo estipulado, cerramos la llave de nivelación y hacemos una marca en la tubería transparente, anotando así el desnivel que se ha producido.
7. Abrimos la llave de nivelación para que el agua retome su posición inicial.
8. Con una probeta graduada, rellenamos el bidón 2 con agua hasta alcanzar la marca del paso 7 y anotando la cantidad total de agua que hemos ido vertiendo. Esta cantidad de agua en mililitros será la misma cantidad de biogás que se produjo durante la medida.



El desnivel producido H2 por el empuje de agua es la cantidad de biogás generado en el tiempo que dura la medición

Figura 23: Esquema explicativo del funcionamiento del gasómetro



Lo ideal sería que esta medida de biogás se realizara a diario para obtener una gráfica de evolución en los treinta días programados; sin embargo debido a la gran cantidad de reactores con los que tenemos que trabajar resulta imposible por cuestión de tiempo, por lo que se realizó una medida cada tres o cuatro días en cada digestor.

### **3. 4. 2 – MEDIDOR DE VOLUMEN DE METANO:**

Como ya indicamos durante el proceso de digestión anaerobia el metano tarda unos días en comenzar a producirse, por lo que es necesario medir con regularidad su porcentaje sobre el biogás producido para saber si éste es utilizable como combustible. Normalmente se espera que durante la primera semana no se produzca prácticamente nada de metano, después aparece un pico importante donde el porcentaje alcanzaría el 70% y por último en los últimos días del proceso se espera una estabilización entorno a este valor. El biogás contiene normalmente trazas de otros gases como CO o H<sub>2</sub>S, pero para el análisis completo necesitaríamos un aparato “ORSAT”, que debido al presupuesto para nuestro proyecto nos pareció perfectamente prescindible.

Este gasómetro para medir la cantidad de gas metano es muy parecido al construido en el apartado anterior, compuesto por dos bidones de plástico, entrada y salida de gas y dos fragmentos de tubería transparente para las mediciones de volumen. Además también utiliza el sistema de desplazamiento de agua. La diferencia con el anterior radica en que para saber cuánto gas metano se está produciendo en el digestor que estamos analizando, tenemos que eliminar el CO<sub>2</sub> contenido en el biogás que entra en el gasómetro.

A continuación explicamos cómo conseguir este cometido y el resto de indicaciones para construir el gasómetro.

#### **A) SECUESTRO DEL GAS CARBONICO:**

La manera de eliminar el dióxido de carbono (también llamado gas carbónico o anhídrido carbónico) en la muestra de biogás es obligar a este último a entrar al bidón a través de una solución de hidróxido sódico (NaOH) o cálcico (CaOH), que actuarán ambos como secuestradores. Al mezclarse por ejemplo con el hidróxido de sodio, el gas carbónico reacciona químicamente formando carbonato sódico que, al ser muy soluble, una parte importante quedará en disolución. El carbonato cálcico en cambio es altamente insoluble y precipitará en su mayoría. El conducto por el que el biogás penetra en el gasómetro contendrá además unas piedras difusoras similares a las que se usan en peceras, para provocar un burbujeo en el biogás que favorece la eliminación del CO<sub>2</sub>, además de impedir la entrada de agua

en la tubería. De esta forma sólo el gas metano se acumula en la parte superior del bidón y a su vez empujará el agua basificada, creando un desnivel en el bidón que nos indicará cuánto metano se está produciendo. Para saber el porcentaje de  $\text{CH}_4$  en el reactor estudiado hay que comparar la medida obtenida con la de biogás total en el mismo digestor y en el mismo tiempo de medida.

Este sistema no es efectivo al 100%, pues a pesar de la solución química algo de gas carbónico inevitablemente pasará sin precipitar, pero la medida sí es válida para saber si el porcentaje de metano en el biogás es suficiente para usar éste como combustible.

## **B) MATERIALES Y HERRAMIENTAS UTILIZADOS:**

- 2 Bidones de plástico de 20 litros con tapón hermético
- 8 Adaptadores de tanque de  $\frac{1}{2}$ "
- 1 Llave de paso en PVC de  $\frac{1}{2}$ " para salida de biogás
- 1 Llave de paso en PVC de  $\frac{1}{2}$ " para nivelación del agua
- 2 Neplo Flex macho de plástico de  $\frac{1}{2}$ " para salida a tubería
- 2 Unión Flex macho de plástico de  $\frac{1}{2}$ "
- 4 Codos de PVC de  $\frac{3}{4}$ " y de  $90^\circ$
- 2 Fragmentos de tubería transparente de  $\frac{3}{4}$ "
- $\frac{1}{2}$  metro de tubería o manguera de jardín de  $\frac{1}{2}$ "
- 4 Abrazaderas de aluminio de  $\frac{3}{4}$ "
- 2 Abrazaderas de aluminio de  $\frac{1}{2}$  "
- 2 Conexión reductora metálica de  $\frac{1}{2}$ " a  $\frac{3}{4}$ "
- 1 Acople rápido hembra metálico de  $\frac{3}{4}$ "
- 1 Acople rápido macho metálico de  $\frac{3}{4}$ "
- 6 piedras de pecera o difusoras
- Hidróxido Sódico ( $\text{NaOH}$ ) o Cálcico ( $\text{CaOH}$ ) al 5%
- Teflón
- Silicona
- 1 Taladro
- 1 Cúter
- Papel de lija

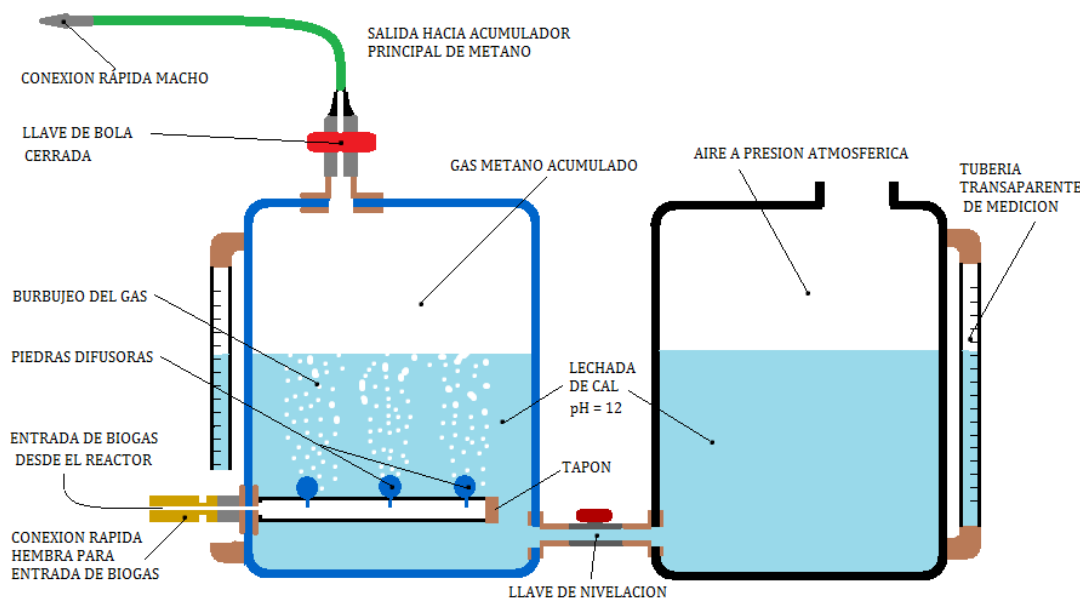


Figura 24: Esquema del gasómetro secuestrador de CO<sub>2</sub>

### C) DETALLES CONSTRUCTIVOS:

No es necesario especificar paso a paso la construcción de este aparato, pues es muy similar al que explicamos en el apartado 3.4.1\_C, pero sí es conveniente explicar algunas diferencias entre ambos montajes y añadir algunos consejos para la construcción:

- Conviene utilizar un bidón con un tapón hermético grande (como el azul en la figura 25), para poder introducir la mano, ya que en este bidón la tubería con las piedras difusoras va en el interior y con la estrecha apertura de los bidones anteriormente utilizados resulta casi imposible dicha maniobra.
- En esta ocasión el acople rápido hembra debe estar bien cerca de la base para que el gas entre en contacto con la solución agua-hidróxido.
- En la tapa del bidón azul hemos colocado, como se aprecia en la figura 25, una salida para gas acabada en un acople rápido. La intención de este montaje es, una vez medida la cantidad de metano, recuperar el mismo al acumulador principal, de manera a no desperdiciarlo ni verterlo a la atmósfera, pues es un importante gas de efecto invernadero.
- Las piedras difusoras irán colocadas en la tubería interior del bidón, que a su vez tendrá un tapón en su extremo para que no entre agua ni escape gas (Ver figura 29).



#### D) MODO DE EMPLEO:

1. Realizamos una marca con bolígrafo en la tubería transparente del bidón 2, indicando el nivel inicial de agua en el mismo antes de que entre biogás.
2. Abrimos el tapón hermético del bidón 2 para que el agua de ese bidón esté a presión atmosférica.
3. Conectamos mediante el sistema acople rápido el gasómetro al reactor en que deseamos medir y cerramos en éste último la llave de paso al acumulador principal.
4. Abrimos la llave de paso del digestor que permite que el biogás entre al gasómetro y empezamos a medir el tiempo. Conviene dejar escapar un poco de gas durante unos segundos sin que afecte a la medida, pues la subida inicial debido a la presión es muy alta y los resultados pueden ser falseados. Además pueden existir restos de aire en los conductos que falsean tanto la proporción de metano como el poder calorífico inferior del biogás.
5. Dejamos durante el tiempo que estimemos oportuno (recomendable 15-20 minutos) que el gas penetre en el bidón, y observamos que el agua comienza a desnivelarse por la presión que el gas ejerce sobre ella.
6. Cuando se cumpla el tiempo decidido, cerramos la llave de nivelación y hacemos una marca en la tubería transparente, anotando así el desnivel que se ha producido.
7. Abrimos la llave de nivelación para que el agua retome su posición inicial.
8. Medimos el desnivel rellenando con agua y anotamos la cantidad de gas metano producida.



*Figura 25: Imagen final del gasómetro secuestrador de CO<sub>2</sub> construido*

### 3.5- CONSTRUCCION DE LA INSTALACION COMPLETA

En este apartado explicamos cómo se terminó la instalación, los distintos elementos que la completan y su papel en la misma.

#### 3.5.1 - BOTELLAS VALVULA DE SEGURIDAD:

Anteriormente indicamos que los digestores fabricados tenían en su extremo para salida de gas una manguera conectada a una T macho de ½" que serviría para añadir una botella-válvula de seguridad; es el momento de explicar para qué sirve esta botella.

La válvula de seguridad es una botella de plástico de 3 litros llena de agua acidulada con ácido clorhídrico al 5% y su misión es evitar que ante una subida brusca de presión algún biodigestor pueda dañarse en sus conexiones. El ácido clorhídrico se añade hasta que el pH de la mezcla sea suficientemente ácido (en torno a 3 o 4 de valor de pH) y evita que el biogás se pierda por la botella, actuando como tapón. Basta por tanto con añadir en la "T" una porción de manguera que quede introducida unos 15 cm dentro de la botella. (Figura 27). Conviene añadir a su vez viruta de hierro o simplemente un estropajo metálico en dicha "T" para que actúe como apagallamas por si la llama retrocediera por el tubo de conexión durante el proceso de quemado del gas.



Figura 26: Agujero cavado para válvula de seguridad

El terreno disponible nos permite incrustar la botella en el suelo para que no se vierta durante algún movimiento de la manguera al remover el digestor. (Figura 26)

#### 3.5.2 - TUBERIA PRINCIPAL:

Como vemos en la figura 27, justo después de la botella de seguridad conectamos cada tubería de cada digestor a una tubería principal que será la que termine en el acumulador de biogás. Aquí basta con añadir una T macho de ½" al final de cada tubería, de manera a poder cómodamente ir conectando pequeñas porciones de tubería según la distancia que necesitemos de un digestor a otro. No olvidar colocar abrazaderas en cada conexión y apretarlas bien para que no haya fugas de gas. Conviene igualmente comprobar que no haya fugas durante el proceso aplicando agua con jabón en las potenciales zonas de escape.



Figura 28: Válvula de seguridad y tubería principal



Figura 27: Imagen de la tubería central

### 3. 5. 3 – SECUESTRADEOR DE GAS CARBONICO:

Como ya hemos explicado, todo el biogás que se genera en los digestores se dirige hacia una tubería principal con el objetivo de acumularlo para su uso en la máquina rotativa secadora. Sin embargo lo que nos interesa realmente utilizar como combustible es el metano de ese biogás, por lo cual al final de la tubería principal decidimos instalar un secuestrador de dióxido de carbono exactamente igual al que diseñamos para el gasómetro de toma de medidas.

Este aparato se instala al final de la tubería principal y antes del acumulador de gas, de manera que el gas que acumulemos será principalmente metano; de esta forma ahorramos espacio en el acumulador y obtenemos posteriormente una combustión mayor. El sistema es un bidón azul, con tapón de rosca grande, de sistema idéntico al explicado en el apartado 3.4.2, aunque con algunas diferencias que pasamos a explicar.

#### MONTAJE:

Este conjunto se compone simplemente de un bidón azul de plástico, una entrada en la base para la tubería principal de gas y en su interior una tubería de  $\frac{3}{4}$ " taponada y con tres piedras difusoras. Es importante que en esta tubería interior al bidón no entre agua. La diferencia principal con el anterior montaje es la conexión con el acumulador, que explicamos a continuación con más detalle.



Figura 29: Tubería interior del secuestrador de CO2 con las piedras difusoras

Esta conexión se compone de los siguientes materiales:

- 1 Adaptador de tanque de ½" adherido al tapón hermético del bidón
- 1 Llave de paso en PVC de ½"
- 5 Unión Flex macho de plástico de ½" para las distintas uniones
- 1 T en PVC hembra de ½"
- 2 Conexiones reductoras metálicas de ½" a ¾"
- 1 Acople rápido hembra metálico de ¾"
- 1 Válvula "Check" para impedir el retorno del gas del acumulador
- 1 Tubería de plástico duro y de ¾" para conectar con el acumulador



*Figura 30: Conexión para salida de gas metano al acumulador*

En la *figura 30* se puede observar el funcionamiento de la conexión construida:

- El acople metálico hembra, a la derecha de la imagen, lo hemos añadido para conectar el gasómetro medidor de volumen de metano y así recuperar la mayor cantidad posible después de la medición.

- La válvula "check" se colocó con el objetivo de evitar que el gas contenido en el acumulador pudiera regresar al secuestrador de CO<sub>2</sub>. Esto puede ocurrir cuando la cantidad de gas acumulada es importante y en cambio la producción de gas en los digestores disminuye; al existir en ese caso una presión mayor en el acumulador el gas podría retornar al bidón, por lo que la función de la válvula instalada es impedir este flujo inverso del gas acumulado.

- La manguera utilizada para el acceso del gas al acumulador (de color negro en la *figura 30*) es de ¼" debido a que el acumulador contiene una válvula de entrada de esta medida.



### 3. 5. 4 – ACUMULADOR DE GAS:

Para acumular el gas que se produce en nuestro montaje se pensó en la goma de una rueda de camión. Esto sería más que suficiente para un digestor o dos, pero en nuestro caso, doce digestores, se quedó bastante escaso pues la producción de biogás fue mayor de la esperada, por ello tuvimos que añadir otro a los pocos días de proceso. Además al estar el sistema en equilibrio con agua líquida, es probable que por las noches al enfriarse se alcance el punto de rocío y se condense, provocando que el gas acumulado se pueda perder. Se recomienda por tanto emplear otro sistema de acumulación más eficaz.



Figura 31: Acumulador de gas

### 3. 5. 5 – SISTEMA DE CALEFACCION Y REFRIGERACION:

La última parte de la instalación consistió en decidir qué sistema utilizar para mantener los biodigestores a una temperatura constante durante el proceso. Como ya hemos comentado, para una digestión adecuada es conveniente que no se produzcan fluctuaciones bruscas en la temperatura interna del reactor, pudiendo algunas de éstas interrumpir el proceso biológico. Lógicamente la temperatura externa influye en la interna de manera importante, con lo cual para mantener una temperatura constante durante los treinta días de proceso pensamos inicialmente en una camisa de agua. Esto consiste en introducir el bidón en un baño de agua, calentado por una resistencia de pecera que mantenga el agua a la temperatura que deseemos de manera constante. Una vez más fue complicado encontrar un recipiente grande para aplicar esta idea y además el precio resultaba excesivo, por la cantidad de bidones con que debíamos trabajar.

Al disponer de un invernadero como lugar de trabajo, teníamos la ventaja que durante el día alcanzábamos una temperatura de 35°C con bastante facilidad. De hecho la mayoría de los días se superaba esta temperatura durante algunas horas, llegando a alcanzar los 45°C en numerosas ocasiones. También se realizó un seguimiento nocturno de temperatura previo a la instalación final, mediante un termómetro registrador de máximas y mínimas, donde vimos que la mínima en noche fría o lluviosa podía alcanzar los 7°C, temperatura igualmente inadecuada para el proceso de digestión.

Por lo tanto necesitábamos una solución para que la temperatura no fuera tan alta (a partir de 40°C cambiamos a rango termofílico) ni tan baja, y además en la medida de lo posible que fuera constante o al menos que no variara de manera brusca. La solución puesta en práctica fue la siguiente:

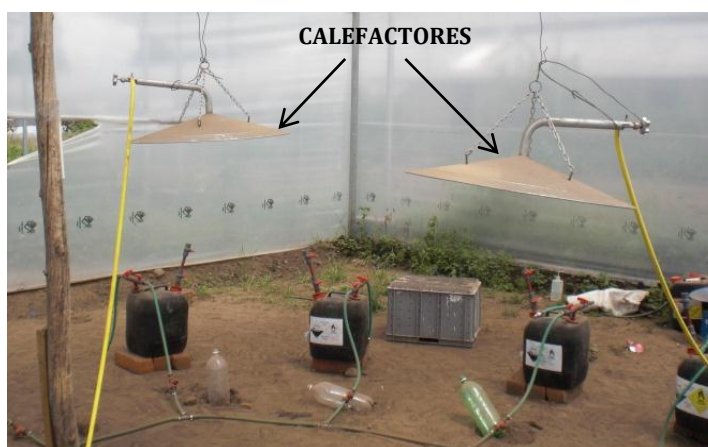
#### A) Para altas temperaturas:

Un sistema de aireación mediante colocación de dos ventanas en el recinto, una frente a la otra, que permanecieran cerradas hasta que la temperatura superara los 35°C. En ese momento al abrir ambas a la vez se produce una corriente de aire que afecta directamente a la zona del recinto donde los digestores están colocados. Esto exige obviamente un control de temperatura continuo durante las horas en que la temperatura sube de manera importante, mediante un termómetro que instalamos en medio de la circunferencia que forman nuestros reactores.

Aunque el sistema es poco práctico, pues exige una atención constante al termómetro y disminuye el tiempo para realizar otras tareas, sí dio buenos resultados y se consiguió que la temperatura se mantuviera constante en esas horas de sol.

#### B) Para bajas temperaturas:

Dos calefactores colocados de manera equidistante a todos los digestores, de manera que ninguno de ellos reciba más o menos calor que otro (*Figura 32*). Con este sistema conseguimos que la temperatura nocturna no bajara de 20°C, lo cual no es suficiente pero al menos no provocaba una interrupción del proceso ni un cambio en el rango de trabajo.



*Figura 32: Sistema de calefacción empleado*



Debido a la climatología de la zona, los calefactores funcionaban durante 14 horas diarias a plena potencia. En días fríos había que mantenerlos encendidos aún más tiempo pues la temperatura durante el día no subía tan rápido. Este sistema tenía por tanto algunos inconvenientes:

- Los calefactores funcionaban con gas tradicional, lo que suponía, debido al importante uso que debíamos darles, un gasto bastante importante de este último y sobre todo el posible problema que el gas terminara durante la noche y se apagara alguno de los calefactores.

- Los calefactores no eran del todo efectivos técnicamente hablando y a veces se apagaban durante la noche, provocando un enfriamiento del laboratorio superior al permitido.

Las posibles soluciones para mejorar el control de temperatura son:

- Intentar implementar el sistema de camisa de agua, que ya ha demostrado dar buenos resultados.

- Aplicar varias capas de lana de vidrio alrededor de cada tanque; la lana de vidrio actúa como aislante y por tanto la temperatura pasa a depender únicamente del interior del digestor, en lugar de verse influido por la temperatura externa. Esta solución es práctica y útil pero también bastante cara pues el precio del metro este material es alto y se necesitan varias capas para asegurar la adiabaticidad.

- Colocar dos calefactores más, pues así se alcanzarían mayores temperaturas y se prevendría en caso de que alguno fallara. Esta solución lógicamente también encarece el proyecto.



*Figura 33: Imagen final de la instalación construida*

### 3.6- DESARROLLO DEL EXPERIMENTO

Pasamos por último a describir la manera de proceder en el experimento realizado, una vez construida la instalación y elegidos los parámetros a analizar. El funcionamiento óptimo de un reactor anaerobio exige la correcta sucesión de un conjunto de etapas que se pueden resumir en puesta en marcha, operación y control de estabilidad. La puesta en marcha es la etapa más crítica y lenta, pues determina la eficacia de operación del digestor durante el resto del proceso. Es estrictamente necesario en esta etapa no cometer ningún error, pues en cuanto el proceso se pone en funcionamiento interrumpirlo supone empezar de cero. No existe un protocolo general para la puesta en funcionamiento de los reactores anaerobios, pero sí es importante obedecer una serie de consignas para lograr una digestión anaerobia productiva.

#### 3. 6. 1 – PREPARACION DEL RESIDUO:

Antes de alimentar cada digestor debemos preparar el residuo de manera que la digestión se realice correctamente. La manera de conseguir esto es ante todo que el residuo esté bien triturado y la mezcla con agua sea perfectamente homogénea. Conviene evitar fragmentos grandes de ramas o hilos pues estos serán difícilmente digeridos.

Como ya indicamos los residuos orgánicos a tratar son exclusivamente agrícolas y recogidos en el mercado de abastos de la ciudad de Ambato. Este mercado mayorista reparte diariamente productos agrícolas a todo el país y genera cientos de toneladas de residuos. Los residuos que recogimos eran básicamente hortalizas y algún resto de fruta, véase acelgas, espinaca, nabo, alfalfa, fréjol y plátano. Se evitaron cítricos como naranja, limón o piña de manera a no acidificar la mezcla.



Figura 34: Residuos agrícolas utilizados para digestión

Los residuos deben ser triturados lo máximo posible de manera a obtener una biomasa homogénea y libre de cuerpos grandes como ramas o hilos. Esto nos evitará problemas en el proceso de digestión como acumulación de sólidos en el fondo del digestor, lo que impide una digestión homogénea de la mezcla, o problemas en la recogida de muestras debido al taponamiento de las salidas.

La trituradora de la que disponíamos no cumplía este cometido en su primera pasada, por lo que hubo que introducir el residuo dos veces a triturar, obteniendo así un mejor resultado. Una vez la materia orgánica triturada, conviene hacer un mezclado con un azadón para que todo quede bien repartido y homogéneo, para preparar después doce muestras lo más idénticas posible.



*Figura 35: Triturado del residuo orgánico*

El análisis a realizar sería primero de contenido en sólidos de cada muestra, lo que explicaremos a continuación, y también del contenido en nutrientes, en concreto de Nitrógeno, Fósforo y Potasio. Este último análisis no se pudo realizar pues no disponíamos del equipamiento necesario para ello, y los análisis en laboratorio suponían retrasar el principio de la digestión tres semanas, haciendo imposible haber terminado el proyecto. Conviene, una vez preparadas las muestras trituradas, guardarlas en una habitación cerrada y en frío para que no se produzca su fermentación y descomposición.



*Figura 36: Muestras preparadas tras paso por la trituradora*



### 3. 6. 2 – CALCULO DE SOLIDOS TOTALES:

Antes de mezclar con agua la muestra de sólido preparada hay que realizar un paso importante y en concreto fundamental para nuestro proyecto, el cálculo de sólidos totales y volátiles de cada muestra. Los residuos con los que trabajamos contienen una importante cantidad de agua y un bajo porcentaje de cantidad sólida. Para saber cuánta agua añadir a la mezcla de manera a cumplir el %ST programado es necesario saber en la muestra de sólido, qué cantidad tenemos de sólido y qué cantidad tenemos de agua. El proceso a realizar para una muestra es el siguiente:

- Separamos el material orgánico triturado en 12 muestras, y de cada una de ellas a su vez tomamos una muestra de 100 gramos.
- Tomamos un recipiente de vidrio, lo pesamos en una báscula y ponemos ésta a cero.
- Introducimos en el recipiente la muestra de solido hasta llegar a 100 gramos ( $M_0$ ).
- Calentamos la muestra en un horno a 105°C durante 18 a 24 horas.
- Dejamos enfriar y pesamos el residuo deshidratado, tomado nota de esta medida ( $M_1$ ).
- Calentamos nuevamente la muestra en horno a 550°C durante alrededor de una hora.
- Dejamos enfriar y pesamos de nuevo, tomando nota de esta segunda medida ( $M_2$ ).

**SOLIDOS TOTALES (ST):** Es la cantidad de materia que queda como residuo tras calentar a 105°C. Por lo tanto la primera medida ( $M_1$ ) anotada será el contenido en sólidos totales de la muestra.

**SOLIDOS TOTALES VOLATILES (STV):** Tras someter los sólidos totales a calcinación (550°C), la materia orgánica se transforma en  $CO_2$  y agua. Esta pérdida de peso se interpreta como materia orgánica volátil, o sólidos volátiles, mientras que la materia que se mantiene, la segunda medida anotada ( $M_2$ ), toma el nombre de sólidos totales fijos (STF), siendo

$$ST = STV + STF \text{ (en gramos)}$$

Los valores que realmente nos interesa conocer son ST (%) y STV (%), para saber cuánta materia sólida y orgánica tenemos en cada muestra. Después de anotar las medidas explicadas se realizan una serie de cálculos sencillos para determinar los valores deseados en cada muestra:

$$ST = M1$$

$$STV = M1 - M2$$

$$STF = M2$$

$$\%ST = \frac{ST}{M0}$$

$$\%STV = \frac{STV}{ST}$$

$$\%STF = \frac{STF}{ST}$$

Explicamos un ejemplo de cálculo con la primera muestra de nuestro experimento:

$$M0 = 100 \text{ gr}$$

$$\text{Tras calentamiento a } 105^{\circ}\text{C}, \quad M1 = 26.2 \text{ gr}$$

$$\text{Tras calcinamiento a } 550^{\circ}\text{C}, \quad M2 = 9.6 \text{ gr}$$

$$ST = 26.2$$

$$STV = 26.2 - 9.6 = 16.6$$

$$\%ST = \frac{ST}{M0} = \frac{26.2}{100} = 26.2\%$$

$$\%STV = \frac{STV}{ST} = \frac{16.6}{26.2} = 63.35\%$$

$$\%STF = \frac{STF}{ST} = \frac{9.6}{26.2} = 36.65\%$$

A continuación incluimos una tabla con el resto de valores para las doce muestras analizadas en nuestro experimento:

MUESTRA	Peso Inicial (gr)	Peso tras calentar a 105°C (gr)	Peso tras calentar a 550°C (gr)	ST(%)	SV(%)	SF(%)	Materia Orgánica (%)
1	100	26,2	9.6	26.2	63.35	36.65	63.35
2	100	28,6	10.45	28.6	63.46	36.54	63.46
3	100	27,4	10.53	27.4	61.57	38.43	61.57
4	100	28,3	10.62	28.3	62.47	37.53	62.47
5	100	27	9.69	27	64.11	35.89	64.11
6	100	26,6	9.70	26.6	63.53	36.47	63.53
7	100	25,9	9.59	25.9	62.97	37.03	62.97
8	100	26,8	9.74	26.8	63.66	36.34	63.66
9	100	27,5	10.52	27.5	61.75	38.25	61.75
10	100	26,7	10.05	26.7	62.36	37.64	62.36
11	100	27,1	9.90	27.1	63.47	36.53	63.47
12	100	27,9	11.18	27.9	59.93	40.07	59.93

Tabla 8: Contenido en sólidos totales y volátiles de las doce muestras de residuo orgánico

Como observamos en la *tabla 8* las doce muestras tienen valores cercanos en cuanto a materia orgánica, sólido seco y humedad, lo que nos permite comprobar que todas las muestras son válidas para el experimento. El siguiente paso es determinar a partir de estos resultados la cantidad de agua que debemos agregar a cada muestra para obtener un sustrato correcto.

La medida Sólidos Totales ST (%) es la que nos va a indicar qué cantidad de agua y de sólido debemos mezclar para preparar el sustrato final. Teniendo en cuenta que en los documentos consultados se recomienda llenar el digestor más o menos en tres cuartos de su capacidad, llenaremos 15 litros de sustrato. Tenemos por tanto que completar 15 litros de *agua + sólido*, cumpliendo en un caso 7% de sólido y en otro 11%.

Presentamos a modo de ejemplo el cálculo para la primera muestra medida, siendo el resto de cálculos análogos a esta. Trabajaremos en *kg* y empleando la equivalencia  $1L = 1kg$  para masas de líquido:

$MT = \text{Masa Total de sustrato, } 15 \text{ kg}$

$Ma = \text{Masa de agua total en el sustrato}$

$Ms = \text{Masa de sólido seco en el sustrato}$

$Msh = \text{Masa de sólido húmedo en la mezcla}$

$Mf = \text{Masa de agua a añadir a la mezcla}$

$$MT = Ma + Ms = 15 \text{ kg}$$

$$\frac{Ms}{MT} = \frac{7}{100} \rightarrow Ms = 0.07 MT = \mathbf{1.05 \text{ kg}}$$

En 100 gr de muestra hay 26.2 gr de sólido, ( $ST = 26.2 \%$ ) por lo cual, para tener 1.05 kg de sólido seco en el sustrato, por regla de tres simple, obtenemos que habrá que añadir:

$$Msh = \frac{1.05 * 100}{26.2} = \mathbf{4.00 \text{ kg}}$$

$$\text{entonces } Mf = MT - Msh = 15 - 4.00 = \mathbf{11 \text{ kg}}$$

Debido a que todos los ST calculados en las doce muestras son muy similares, la cantidad de agua y de sólido a añadir fue muy parecida en todos los casos, cambiando únicamente en algunas décimas, por lo que no nos parece necesario especificar este dato para todas. En aquellos reactores con  $ST = 11\%$ , el valor medio añadido fue:

$$Ms = 1.65 \text{ kg}$$

$$Msh = 6 \text{ kg}$$

$$Mf = 9 \text{ kg}$$



### 3.6.3 – PUESTA A PUNTO:

Una vez calculada la cantidad de sólido y agua a mezclar, depositamos ambas cantidades en una cubeta graduada de 15 litros y mezclamos de manera homogénea sólido y agua, intentando eliminar grandes masas de sólido formadas para facilitar el proceso de digestión.

Antes de introducir el sustrato en el reactor debemos medir el pH e intervenir para obtener el valor que deseamos, es decir 6,7 o 7,3. En todas las muestras que preparamos el pH era más bajo de lo que deseábamos, por lo que fue necesario añadir cal lechosa a la mezcla hasta alcanzar el valor requerido. En ningún caso la cantidad añadida falseaba de manera importante los valores de ST en el sustrato. Conviene a su vez que el agua que añadimos esté a una temperatura cercana a la que queremos trabajar, para facilitar el proceso desde el primer día.

Por último, alimentamos el digestor con un embudo, con cuidado de no perder materia, y cerramos la tapa fuertemente para empezar la digestión.

A continuación presentamos una tabla con la disposición final de cada biodigestor y detallando la cantidad de cal añadida en cada uno para regular el pH (Tabla 9). Observamos que dicha cantidad sigue un patrón bastante constante si representamos la serie “pH final” vs. “Cal añadida”, excepto algunos casos aislados.

REACTOR	ST (%)	pH final	pH inicial	Cal añadida (ml)
1	7	6,7	6,5	15
2	7	7,3	6,5	150
3	11	6,7	5,9	110
4	11	7,3	5,5	300
5	7	6,7	6,5	40
6	7	7,3	6,4	125
7	11	6,7	6	50
8	11	7,3	5,7	250
9	7	6,7	6,2	50
10	7	7,3	6	150
11	11	6,7	5,9	115
12	11	7,3	5,6	200

Tabla 9: Distribución de digestores en la instalación según parámetros y cantidad de cal lechosa añadida en cada uno.

### **3. 6. 4 – CONTROL Y OPERACIONES DURANTE EL PROCESO:**

El control rutinario de nuestra instalación para nuestro proyecto y para futuros trabajos comprende finalmente las siguientes actividades a realizar antes y durante el proceso de digestión anaerobia en todos y cada uno de los digestores:

#### **Operaciones Anteriores:**

- Medir pH y temperatura (calentar agua a 35°C)
- Medir relación N/P
- Cálculo de ST
- Cálculo de STV

#### **Control Diario:**

- Medida de pH
- Medida de Temperatura interna
- Agitar manualmente para mantener homogeneidad y evitar sedimentación
- Añadir cal lechosa en caso de descenso de pH

#### **Operaciones cada 3 – 4 días:**

- Medir caudal de biogás
- Medir porcentaje de metano en el biogás
- Medir nutrientes (N, K, P)
- Medir capacidad calorífica del biogás

En nuestro proyecto no fue posible medir la relación de nutrientes nitrógeno, fósforo y potasio ni antes ni durante ni después del proceso, por problemas de tiempo, materiales y presupuesto.

## 4. SECADO TERMICO DEL COMPOST

### 4.1- FUNDAMENTOS DEL SECADO TERMICO

El compost obtenido tras el proceso de digestión anaerobia se caracteriza por un alto contenido en agua, lo cual le confiere un volumen importante y dificulta su uso y disposición final. Resulta más difícil eliminar agua en el material orgánico debido al menor tamaño de sus poros y el agua existente dentro de los mismos, así como al agua intracelular.

Uno de los sistemas de deshidratación de fangos más eficaces es el secado térmico. Con él se elimina más de un 90% de la humedad presente en el fango o residuo orgánico a tratar. El secado térmico puede ser directo, indirecto o por radiación, teniendo cada uno sus ventajas e inconvenientes pero también siendo cada uno más apropiado según la naturaleza del producto, su destino final, su grado de estabilización o el grado de sequedad requerido.

El secado directo consiste en un contacto directo entre la corriente de gases calientes y el material húmedo. Su rendimiento aumenta con la velocidad del fluido. El secado indirecto en cambio es un sistema de transmisión de calor por conducción en el que el secado es por contacto entre el producto húmedo y las paredes del calentador. Aquí el rendimiento aumenta si la capa de compost es fina.

#### 4. 1. 1- SECADO DIRECTO:

La tecnología de secado directo, como ya hemos indicado, se caracteriza por una transmisión de calor al producto húmedo por convección, por contacto directo entre los gases calientes y el material a secar. La temperatura de secado es muy variable, puede ser hasta de 730°C en los gases calientes, que es la temperatura limitante para casi todos los materiales de uso común, aunque generalmente oscila entre 250 y 400°C. En nuestro caso por ser un sistema de laboratorio y las cantidades de sólido a secar pequeñas, usaremos una temperatura menor, entorno a los 80°C.

A temperaturas inferiores al punto de ebullición, el contenido de vapor de agua en el gas influye en la velocidad de secado y en el contenido final de humedad del sólido. Con temperaturas de gas superiores al punto de ebullición en todos los puntos, el contenido de vapor del gas tiene sólo un ligero efecto de retardo en la velocidad de secado y en el contenido final de humedad.

Para secados a temperaturas bajas y cuando las humedades atmosféricas son excesivamente elevadas, puede ser necesario deshumidificar el aire de secado introducido en el sistema. La eficiencia mejora al aumentarse la temperatura del gas de entrada, para una temperatura de salida constante.

#### 4.1.2- SECADO INDIRECTO:

En los sistemas de secado indirecto el calor se transfiere al material húmedo por conducción; por tanto el medio de calentamiento (aceite térmico o vapor) está separado del material húmedo por una pared de retención de sólidos, casi siempre metálica. Es fundamental asegurar el contacto de las partículas del producto con la superficie portadora del calor sin que se produzcan sobrecalentamientos locales, para permitir así una óptima transmisión del calor y evitar que el producto se queme. Los secaderos indirectos tienen dos ventajas principales. Por un lado, al introducir en el secadero una cantidad limitada de aire, la emisión de aire contaminado y de olores es considerablemente más pequeña que en los secaderos directos. Por otro, el riesgo de incendio y explosión se reduce considerablemente ya que la cantidad de oxígeno en el secadero es mucho menor.

Estos sistemas de secado indirecto son apropiados para secar a presiones reducidas y en atmósferas inertes, para evitar la formación de mezclas explosivas o la oxidación de materiales que se descomponen con facilidad.

#### 4.2- VENTAJAS TECNICAS DEL SECADO TERMICO

El secado térmico directo o indirecto presenta ciertas ventajas técnicas, sea cual sea el producto final y su destino:

- Estructura granular del fango seco: permite el uso de maquinaria clásica y mayor facilidad de tratamiento posterior.
- La estabilización evita problemas de olores.
- La higienización destruye los elementos patógenos.
- Fácil almacenamiento y reducción de costes de transporte.

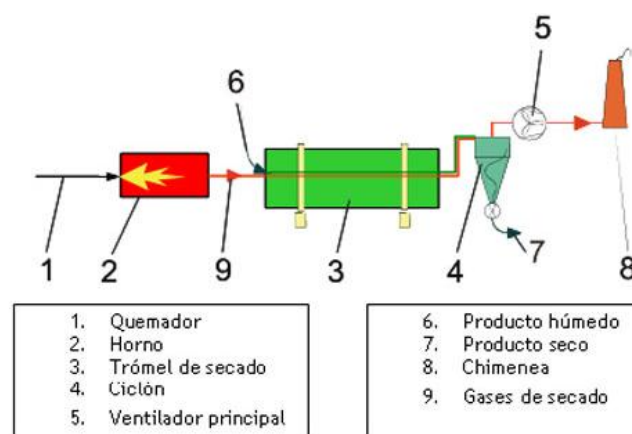


Figura 37: Ejemplo de instalación de secado térmico directo  
Fuente: [www.otersu.es](http://www.otersu.es)

### 4.3- SECADO DIRECTO CON MAQUINA ROTATIVA TROMEL

Las tecnologías de secado térmico existentes en el mercado son variadas; la elección de la más adecuada en cada caso supone considerar los objetivos y dificultades resultantes de la naturaleza de los fangos a tratar, del destino final del producto y de los diferentes parámetros ligados a las condiciones específicas de cada proyecto.

Para nuestro proyecto deseábamos básicamente los siguientes parámetros:

- Obtener granos de fertilizante lo más pequeños posibles para facilitar la alimentación al terreno y su transporte.
- Obtener granos de fertilizante con la menor humedad posible en su interior, para que el rendimiento en alimentación al terreno sea superior.
- Aparato manejable, compacto y fácil de construir, de manera que no sea necesario contratar una mano de obra especializada.
- Aparato no contaminante, con tratamiento de salida de gases y consumidor del biogás obtenido en el experimento.

Dentro de los diferentes secadores que existen en el mercado, se distinguen como ya hemos indicado los secadores directos o por convección y los indirectos o por conducción. Estos son algunos ejemplos:

#### **Secadores Directos:**

- Secadores de Lecho Fluido
- Secadores de Banda
- Secadores de Tambor Rotatorios
- Secadores "Flash"

#### **Secadores Indirectos:**

- Secadores de capa fina
- Secadores de disco
- Secadores de bandeja
- Secadores de haces tubulares

No parece necesario explicar todos y cada uno de los distintos tipos de secadores que existen en el mercado. Debido a los objetivos que nos marcamos par este proyecto pensamos que lo más sencillo y útil de diseñar sería un secador de tambor rotatorio, también llamado trómel o zaranda rotativa.

Los secadores rotatorios son los más usados a nivel industrial debido a su gran capacidad y moderado costo de operación, como puede apreciarse en diversas



plantas industriales en Europa. A su vez presentan la desventaja de aglomerar material en zonas en que la carcasa está en contacto con los elevadores o pestañas, provocando una bajada en la eficiencia de estos, pues los elevadores no tendrán superficie para levantar el material y se obtendrá un producto final de mala calidad. La opción de utilizar para un proyecto un secador rotatorio solo debe tenerse en cuenta cuando el producto a secar no sea excesivamente pastoso ni pegajoso, y cuando se desee trabajar con grandes capacidades, ya que es en esto donde muestra su mejor desempeño.

Durante el proceso de secado térmico en cilindro rotativo el fango experimenta diversos cambios estructurales, distinguiéndose las siguientes etapas:

- Ebullición libre (hasta el 40%): la estructura y la circulación del lodo siguen siendo estables.
- Plástica (del 40 hasta el 60%): el lodo llega a ser muy pegajoso y difícil de manejar, ya que se apelmaza y bloquea los sistemas de desplazamiento por el interior del secadero.
- Granular (del 60 al 80%): el lodo comienza espontáneamente a formar gránulos. Durante esta etapa el lodo puede seguir siendo algo pegajoso.
- Endurecimiento (a partir del 80%): el lodo se va endureciendo alcanzando la dureza final del producto. En esta etapa, si el lodo no es conducido convenientemente, se produce polvo debido al desgaste.

El secado directo con trómel es la tecnología de secado clásica por excelencia por su sencillez de construcción y manejo y su alta eficiencia energética. El trómel es un aparato cilíndrico fabricado normalmente en metal galvanizado (para evitar su corrosión por los productos húmedos a tratar) y con una ligera inclinación que permite el avance del producto durante el secado en el interior del secadero y la caída progresiva del residuo según se va secando. El movimiento rotativo del trómel propicia que el producto tratado vaya volteando a la vez que avanza longitudinalmente por el cilindro. Por un extremo del tubo se introduce aire caliente obtenido de un quemador de combustible gaseoso (por ejemplo biogás) y que circula por el trómel debido a la impulsión de un ventilador, entrando en contacto directo con el producto a tratar y produciendo su deshidratación. A la salida del trómel se requiere un sistema de depuración de gases, como un ciclón, para separar el producto del flujo de gas y evitar así la emisión a la atmósfera de partículas y compuestos orgánicos volátiles. Por último, el residuo se recoge seco por una tolva de salida en forma de granos de pequeño diámetro.

Las ventajas del secado directo con trómel son:

- Bajo consumo energético
- Tecnología totalmente probada
- Óptima calidad de producto final
- Facilidad de construcción y de manejo
- Posibilidad de automatización



Figura 38: Trómel industrial. Fuente: [www.prodesa.net](http://www.prodesa.net)

Debido a las nuevas vías de valorización, adquiere una gran importancia la calidad física de las partículas del lodo seco en lo que hace referencia a la dureza, densidad aparente y tamaño de las mismas. Es importante que el producto seco contenga una cantidad mínima de polvo debido principalmente a las siguientes razones:

- Al ser orgánico, el polvo seco del lodo es explosivo.
- El almacenamiento del polvo conlleva riesgos más elevados de ignición e incendio que el almacenamiento de partículas.
- La manipulación del lodo seco con alta concentración de polvo provoca un impacto ambiental negativo y causa problemas de salubridad al personal que lo manipula.

El producto final granulado debe ser por tanto suficientemente duro para que en el transporte, manipulación y mezcla no se produzcan niveles excesivos de polvo. La densidad, directamente relacionada con la dureza de las partículas, debe ser tan alta como sea posible, facilitando el almacenamiento y transporte del producto. En la valorización del lodo como fertilizante agrícola, los granos deben tener tamaños entre 1 y 5 milímetros y una densidad mínima de  $650 \text{ kg/m}^3$ , comparable a los fertilizantes industriales de baja densidad a granel.

## 4.4- CONSTRUCCION DEL TROMEL DE LABORATORIO

La idea principal de este diseño era una máquina eficaz, duradera y de tamaño no muy grande para poder usarla con comodidad y que no ocupara mucho espacio en el recinto de trabajo. Teniendo en cuenta que formará parte de un laboratorio y de una instalación completa de reactores, se diseñó con la idea de que fuera manejable y fácilmente transportable en caso de necesidad. El diseño propuesto y que se llevó a cabo contaba con las siguientes consideraciones:

### 4. 4. 1- PAUTAS PARA EL DISEÑO:

- Cilindro rotatorio de metal galvanizado. Se pensó en dos cilindros concéntricos para que el exterior recogiera pequeñas partículas del interior, pero finalmente por operatividad y en aras de simplificar el diseño se consideró un montaje más sencillo con un solo cilindro rotativo.
- Eje central de metal galvanizado unido al cilindro interior mediante aspas de metal, de manera a asegurar el giro solidario con el cilindro.
- Contacto directo entre gases calientes y producto húmedo.
- Quemador colocado en la salida de producto seco, de manera que el gradiente de temperaturas de los gases fuera en contracorriente con el desplazamiento del sólido a secar, aumentando con ello la eficiencia de transferencia de calor entre los gases y el sólido.
- Soporte estructural de metal reclinable para regular el ángulo de inclinación deseado y poder ensayar con distintas velocidades de flujo de material a secar.
- Rampa de decantación a la salida, para que el producto caiga por gravedad separándose del aire caliente sin ningún mecanismo que pueda limitar su tamaño.
- Cubeta de entrada en uno de los extremos para alimentar el material húmedo.
- Motor de potencia regulable cercano a 1kW.
- Ciclón a la salida de los gases calientes para retirar las posibles partículas sólidas arrastradas por los mismos y evitar su emisión a la atmósfera.

#### 4. 4. 2- ESQUEMA DEL DISEÑO:

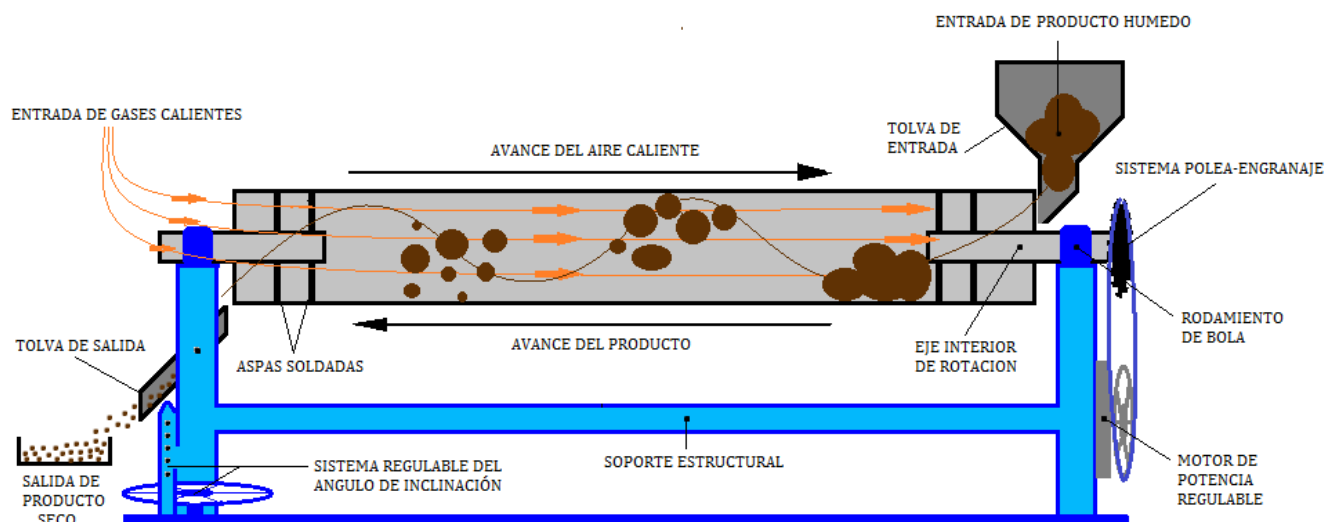


Figura 39: Esquema del secador rotativo diseñado y su funcionamiento previsto

#### 4. 4. 3- MATERIALES UTILIZADOS:

- 2 Chapas de acero galvanizado de 1,20 metros de longitud, 60 cm de ancho y 1 cm de espesor.
- 1 Chapa de metal galvanizado de 60 cm de largo y ancho, y 1 cm de espesor.
- 1 Soporte estructural de metal que incluye un sistema regulador de altura.
- 2 Ejes de metal galvanizado cilíndricos, de 60 cm de largo y 10cm de diámetro.
- 12 Aspas de metal galvanizado cilíndricas, 20 cm de largo y 2cm de diámetro.
- 2 Rodamientos de bola para sujeción y rotación del eje central.
- Sistema de polea y engranaje para motor de potencia.
- 1 Motor de potencia de 1000 Vatios regulable.
- 1 Quemador
- 1 Ventilador de baja potencia
- Chapas de metal para rampa de salida y tolva de entrada

#### 4. 4. 4- CONSTRUCCION DEL TROMEL:

La construcción de la máquina rotativa secadora precisó, por petición de la UTA y sus tutores, de ayuda profesional debido a la complicación de algunas partes del proceso en cuanto a soldaduras y colocación de algunas piezas importantes. Se decidió hacer una máquina de 3 metros de longitud y unos 50 cm de diámetro, siguiendo las pautas marcadas en el diseño ideado.

Este es el paso a paso ilustrado de la construcción del trómel:

**Paso 1:** Partimos de tres chapas de metal galvanizado para evitar que se dañe el interior por la acción de productos corrosivos. Estas chapas son de 1.20 metros de longitud dos de ellas y algo más corta la tercera, de manera a hacer un conjunto de tres metros de longitud (*Figura 40*). Las chapas se pliegan en forma de cilindro y se unen en sus extremos por medio de remaches y con una capa de soldadura que asegure una unión inquebrantable. Una vez tenemos las tres, las unimos igualmente por soldadura para crear un cilindro de la longitud requerida para que el sólido pase el tiempo suficiente dentro de la máquina.



*Figura 40: Esqueleto del tromel de secado, formado por tres chapas de metal formando un cilindro y unidas por soldadura*

**Paso 2:** Una vez más por soldadura colocamos el eje central interno que permitirá el giro del trómel, como vemos en la *figura 41*, mediante aspas cilíndricas de metal unidas al mismo eje y al cilindro rotatorio (*Figura 42*). Vemos que el eje debe sobresalir del cilindro en ambos extremos para después acoplar a él el motor que



lo hará girar. Debido a que la longitud del trómel no es excesiva, se decidió, en lugar de usar un eje que atravesara la superficie total del cilindro, usar dos fragmentos más cortos en ambos extremos que aseguran igualmente el giro de la máquina, ahorrando así costes de material (*Figura 41*).

Se pueden añadir aspas planas de metal dentro del cilindro de manera que el sólido impacte con ellas, avanzando por tanto más lentamente y así permaneciendo más tiempo en contacto con los gases calientes.



*Figura 41: Unión entre eje central y cilindro interior para asegurar el giro solidario entre ambos*



*Figura 42: Detalle de la soldadura entre aspas de metal, eje central y cilindro interior*

**Paso 3:** Extremo de salida del trómel. A continuación unimos el conjunto fabricado a su soporte estructural, hecho de metal y que dispone de una rueda reguladora de altura en el extremo de salida del cilindro. El objetivo de esta rueda es nivelar según la necesidad el ángulo de inclinación del trómel, pues de esta forma regulamos a su vez la velocidad de flujo del producto a secar (*Figura 43*).



*Figura 43: Rueda de nivelación del soporte estructural del tromel*

La unión entre soporte y cilindro se realiza mediante un rodamiento de bola que asegura tanto la sujeción al soporte como el giro del eje central (*Figura 44*).



*Figura 44: Rodamiento unido al soporte y al eje central de rotación*

Añadimos por último la tolva de descarga de metal en el mismo extremo del cilindro, anclada al soporte estructural mediante tornillos (*Figura 45*).



*Figura 45: Tolva de salida para producto seco*

Este extremo del trómel también contendrá la entrada de gases calientes, aunque el quemador y el ventilador que impulsará a éstos, irán externos al conjunto. Los gases entrarán por el lado opuesto al de alimentación para mejorar el rendimiento del secado térmico. La entrada de gases se produce por una tubería externa (tubería amarilla de la *Figura 47*) conectada a este extremo de la máquina. El sistema se completa con una tolva de entrada de forma de pirámide cuadrangular invertida, construida aparte con chapas de metal, para alimentar el producto húmedo.

**Paso 4:** Extremo de entrada del trómel. En este caso añadimos en el extremo opuesto el motor encargado de dar potencia y rotación al conjunto. El sistema motor diseñado se compone un engranaje unido por rodamiento al eje central del cilindro y una polea situada más abajo y en contacto con el motor. El propio motor se encuentra unido al soporte estructural dentro de una caja metálica, como contención física para evitar accidentes (*Figura 46*).





*Figura 46: Sistema motor para giro del tromel*

**Paso 5:** Terminamos la construcción del trómel añadiendo pequeños detalles constructivos, como colocar una tapa al sistema de poleas y algunas otras zonas móviles susceptibles de ser dañadas o producir accidentes al personal. Por último se pintó el conjunto para darle un aspecto más adecuado. (Figura 47)



*Figura 47: Imagen final del trómel de secado construido*

#### 4. 4. 5- MEJORAS CONSTRUCTIVAS:

El trómel diseñado y construido para este proyecto es un modelo básico, construido con material disponible en la región y con el importante hándicap del poco tiempo disponible para su construcción. Pero existen estudios y documentos que proponen alternativas importantes para mejorar el rendimiento del secado térmico en estos aparatos. A continuación proponemos distintas posibilidades en la construcción de una máquina rotativa de secado:

##### A) Palas internas de volteo:

El principal problema de un trómel convencional de simple paso como el nuestro es que el residuo a secar atraviesa demasiado rápido el cilindro y por ello no se llega a producir una deshidratación efectiva en el producto, sobre todo en de las capas internas del mismo, al actuar las capas exteriores secadas inicialmente como barrera a la difusión del vapor de agua interior, así como de aislante térmico. En otros sistemas llamados de doble o triple paso, que incluyen paletas interiores fijas, sí se consigue que el producto tarde más tiempo en recorrer el trómel y por tanto su secado es mejor. Sin embargo, al intentar procesar productos de fibra larga, como los resultantes de la digestión anaerobia de residuos vegetales que nos ocupa, se pueden producir atascos y obstrucciones en el recorrido del sólido, lo que obliga frecuentemente a detener el funcionamiento del trómel para su limpieza y reacondicionamiento, implicando éstas acciones un gran contratiempo al tener que enfriar y volver a calentar el equipo. La inclusión en el cilindro de palas multivoltteo en su superficie interna permite un mejor contacto sólido-gas y con ello una mayor eficiencia en el proceso de secado, favoreciendo su deshidratación y sin producir atascos en su avance. Así se consigue un flujo suave y continuo del producto independientemente de su tamaño de fibra y a su vez un mayor tiempo de contacto entre el sólido y el aire caliente. Las palas de volteo pueden ser de chapa perforada o de caucho anti desgaste de alta resistencia a la abrasión (*Figura 48*), y permiten disposiciones muy variadas, según se entienda que producirán mayor rendimiento.



*Figura 48: Ejemplo de palas internas de volteo*



### **B) Generador mixto de aire caliente:**

Una gran mejora sobre los procesos convencionales la constituye la incorporación de un generador mixto de aire caliente formado básicamente por una etapa de precalentamiento del aire seguida de un ventilador impulsor del aire, para pasar a continuación a una segunda etapa de calentamiento a alta temperatura en un quemador de combustibles gaseosos o bien utilizando energía eléctrica. Este tipo de generador mixto de aire caliente presenta la importante ventaja de que al incorporar una etapa de precalentamiento basada en un horno de combustibles sólidos permite la utilización de combustibles de muy bajo coste, tales como biomásas y otros desechos agrícolas, ganaderos o industriales, en parte del proceso de calentamiento del aire, contribuyendo de una forma ecológica y económica a la eliminación de dichos residuos. Ello permite obviamente disminuir en gran medida el coste económico de los combustibles utilizados en el proceso, ya que en la segunda etapa de calentamiento, que es la que utiliza combustibles más caros, al entrar el aire ya precalentado, no es necesario tanto consumo de combustible por ser la diferencia de temperatura a cubrir mucho menor.

### **C) Doble ventilador:**

Otra mejora propuesta en estudios sobre secaderos rotativos es disponer un sistema de dos ventiladores, uno del tipo impulsor entre las dos etapas de generación de aire caliente y otro de aspiración a la salida de la máquina. Esto permite mejorar el rendimiento dentro del sistema de secado, consiguiendo una velocidad mayor del flujo de aire caliente a través del trómel de deshidratación, con una consecuencia clara en un mejor y más rápido secado. Asimismo ello permite que el ventilador de aspiración situado después del trómel sea de menor potencia, con la consiguiente disminución tanto del coste de instalación como de la energía necesaria para su funcionamiento.

### **D) Redirección del flujo de gas:**

Esta idea es una propuesta de “GRANDE GRUPO ANDALUZ DE ESTUDIOS, S.L” en su patente publicada en 2010 titulada “*Sistema de inyección de gases en el interior de un trómel de secado*”. Consiste en cambiar la forma del trómel para acelerar la entrada de gases calientes y redirigir el flujo de dichos gases para que se muevan de manera helicoidal en el trómel, aumentando así el contacto gas-sólido dentro del cilindro.

Debido a la manera de operar del trómel habitualmente construido, se producen una serie de problemas e inconvenientes en cuanto al flujo de aire caliente:

- La inyección directa de los gases de combustión supone un arrastre de partículas de inquemados incandescentes, con el consecuente peligro de incendio y una mayor concentración de emisiones de partículas a la salida del trómel.

- La inyección del flujo de gas es paralela a las paredes del trómel, por lo que el tiempo de residencia del gas y por lo tanto el tiempo de contacto gas-sólido, depende exclusivamente de la longitud del trómel.
- La acumulación del producto sólido en la parte inferior del trómel hace que a veces solo la capa superior de éste esté en contacto con el gas y que por tanto solo sea dicha capa superior la que se seque, y que si el flujo de aire es laminar y paralelo al eje principal del trómel, una parte importante de los gases calientes no entren en contacto con el sólido a secar, al encontrarse este fundamentalmente próximo a las paredes debido a la fuerza centrífuga..

Este sistema es diferente pues el trómel propuesto no es rotativo sino estático, y su forma es en "U" de sección cuadrada en lugar de cilíndrica. Este diseño pretende conseguir crear un flujo turbulento de los gases calientes procedentes de la cámara de combustión que girará alrededor del eje del trómel a medida que discurra por el interior de éste, consiguiendo un mejor contacto entre aire caliente y producto a secar.

Las ventajas previstas de este montaje son:

- Reducir emisiones de partículas antes de la entrada en el trómel.
- Aumentar el tiempo de residencia de los gases de secado dentro del trómel.
- Mejorar el rendimiento energético del proceso.
- Uniformizar el secado del producto.

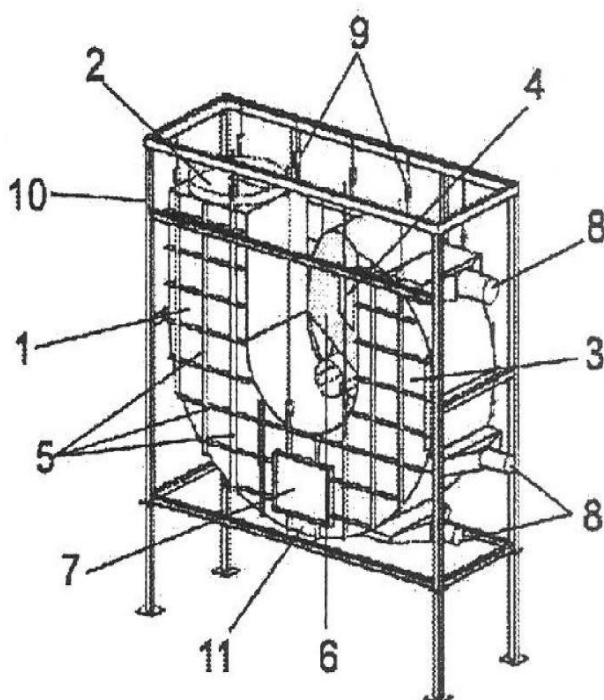


Figura 49: Esquema del trómel propuesto para redirección del flujo de aire caliente

**Funcionamiento:** El aire caliente entra por la parte superior del conducto (2) y es dirigido hacia la primera curva, (11) donde se acelera su velocidad debido a un aumento en las fuerzas centrípetas. Estas fuerzas afectan más a las partículas que al gas, y provocan que se depositen en los colectores de cenizas (8). En la rama espiral (3) se produce otro aumento de la velocidad del gas debido a otro cambio en la dirección del flujo, de manera que aumenta la turbulencia y debido a la dirección en espiral en vez de recto, hace que el flujo turbulento recorra más espacio y por lo tanto el tiempo de contacto gas-sólido sea superior.

## 5. RESULTADOS

### 5.1- RESULTADOS DE LA DIGESTION ANAEROBIA

Presentamos a continuación los resultados obtenidos en los experimentos de digestión anaerobia en cuanto a volumen diario de biogás y de metano, cantidad de metano producido con respecto a dicho volumen y capacidad calorífica del biogás.

#### 5.1.1- VOLUMEN DE BIOGAS Y DE METANO:

Como ya hemos explicado anteriormente, se realizaron para cada uno de los 12 reactores las medidas tanto de volumen de biogás como de metano. Ambos volúmenes se midieron durante 15 minutos y cada tres o cuatro días (según lo permitiera el calendario) para después calcular la proporción en *ml/día*.

Presentamos los resultados en forma de tablas y gráficas de evolución. A partir del día 16 la producción de gas fue muy baja, y a partir del día 24 se dejó de producir gas, por lo que estos días no aparecen en las tablas. Aun así el experimento se mantuvo los 30 días estipulados para comprobar resultados en los sólidos digeridos.



*Figura 50: Imagen del acumulador lleno de gas el día 20 del experimento*

## EXPERIMENTO 1: pH = 6.7 ST = 7%

Estos son los resultados obtenidos de volumen de biogás y metano medidos en los distintos gasómetros para los reactores 1, 5 y 9, con pH = 6.7 y ST= 7%, durante 30 días:

REACTOR	pH	ST	Día 5		Día 9		Día 13	
			V biogás (ml/día)	V metano (ml/ día)	V biogás (ml/ día)	V metano (ml/ día)	V biogás (ml/ día)	V metano (ml/ día)
1	6.7	7%	490	0	820	130	1230	550
5			550	0	838	150	1175	620
9			500	0	780	90	1270	600

REACTOR	pH	ST	Día 16		Día 20		Día 24	
			V biogás (ml/ día)	V metano (ml/ día)	V biogás (ml/ día)	V metano (ml/ día)	V biogás (ml/h)	V metano (ml/ día)
1	6.7	7%	1190	690	560	390	110	70
5			1042	705	475	320	100	50
9			998	650	500	350	135	75

Tabla 10: Evolución del volumen de biogás y metano durante el experimento 1

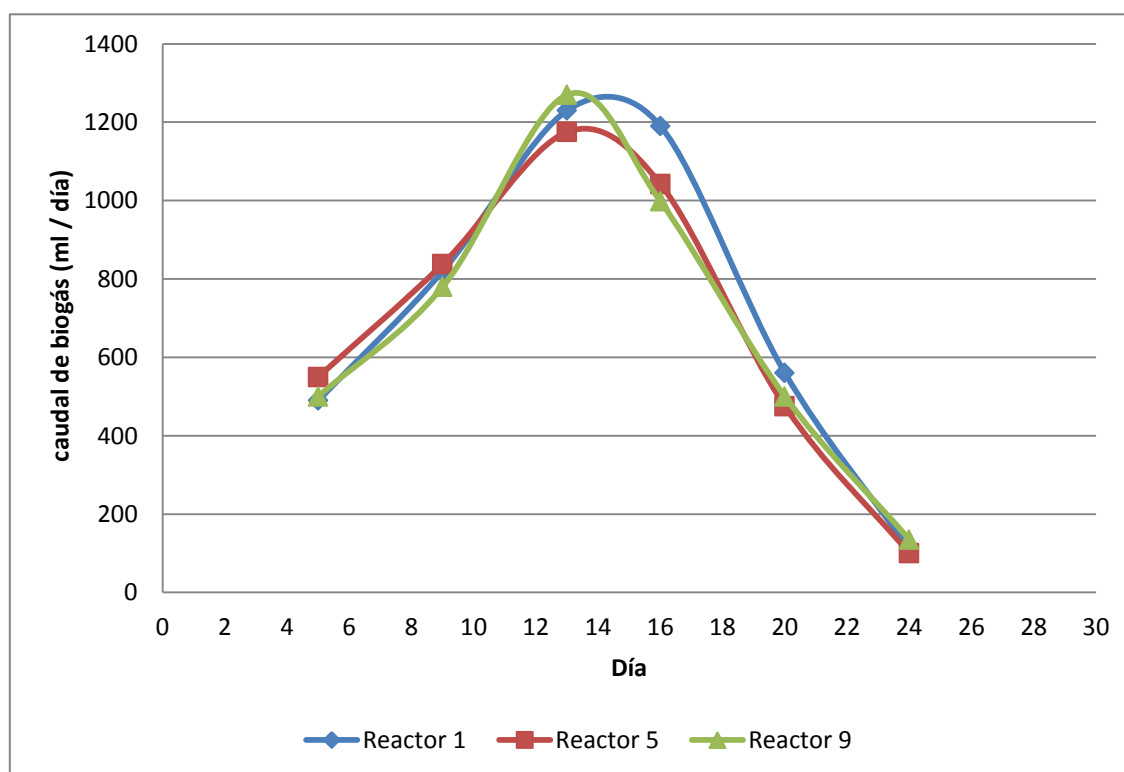


Figura 51: Evolución de la producción de biogás en el experimento 1

## EXPERIMENTO 2: pH = 7.3 ST = 7%

Estos son los resultados obtenidos de volumen de biogás y metano medidos en los distintos gasómetros para los reactores 2, 6 y 10, con pH = 7.3 y ST= 7%, durante 30 días:

REACTOR	pH	ST	Día 5		Día 9		Día 13	
			V biogás (ml/ día)	V metano (ml/ día)	V biogás (ml/ día)	V metano (ml/ día)	V biogás (ml/ día)	V metano (ml/ día)
2	7.3	7%	330	0	720	117	1050	480
6			250	0	680	110	890	390
10			350	0	710	90	990	475

REACTOR	pH	ST	Día 16		Día 20		Día 24	
			V biogás (ml/ día)	V metano (ml/ día)	V biogás (ml/ día)	V metano (ml/ día)	V biogás (ml/ día)	V metano (ml/ día)
2	7.3	7%	900	550	350	240	80	45
6			850	555	320	220	75	50
10			950	590	400	285	110	60

Tabla 11: Evolución del volumen de biogás y metano durante el experimento 2

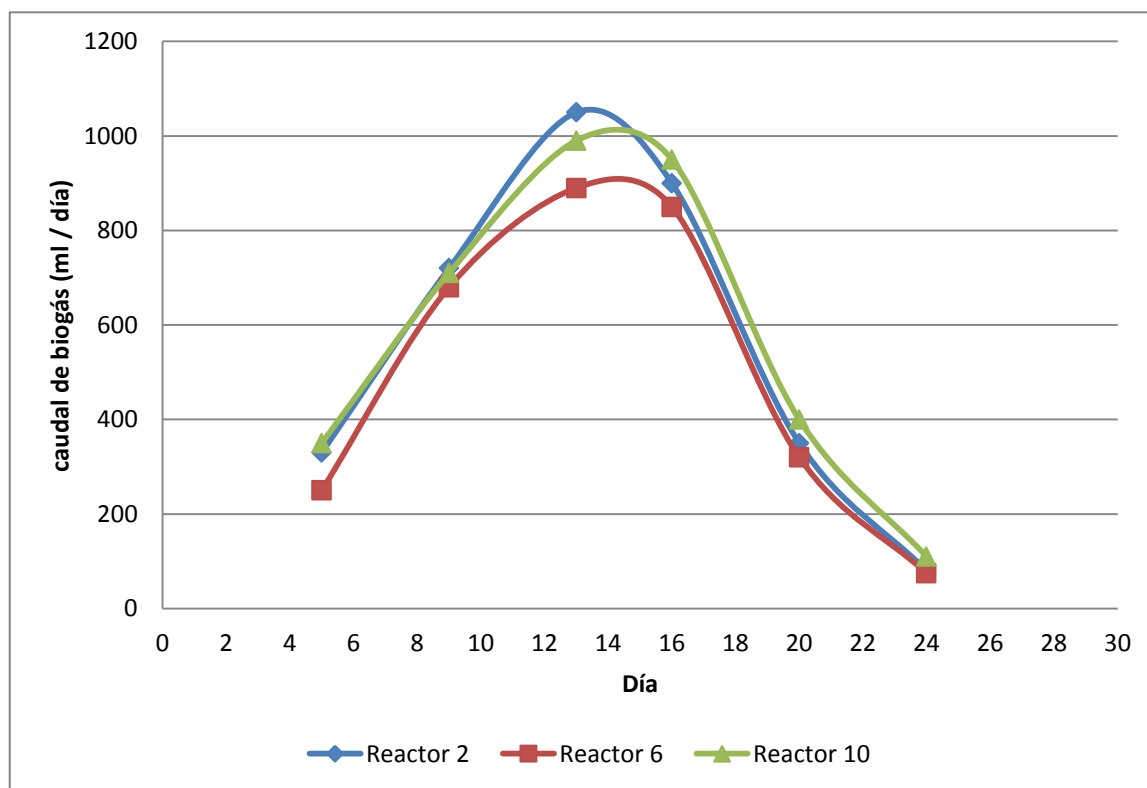


Figura 52: Evolución de la producción de biogás en el experimento 2



### EXPERIMENTO 3: pH = 6.7 ST = 11%

Estos son los resultados obtenidos de volumen de biogás y metano medidos en los distintos gasómetros para los reactores 3, 7 y 11, con pH = 6.7 y ST= 11%, durante 30 días:

REACTOR	pH	ST	Día 5		Día 9		Día 13	
			V biogás (ml/ día)	V metano (ml/ día)	V biogás (ml/ día)	V metano (ml/ día)	V biogás (ml/ día)	V metano (ml/ día)
3	6.7	11%	520	0	850	250	1262	775
7			550	0	860	275	1310	850
11			500	0	890	260	1290	820

REACTOR	pH	ST	Día 16		Día 20		Día 24	
			V biogás (ml/ día)	V metano (ml/ día)	V biogás (ml/ día)	V metano (ml/ día)	V biogás (ml/ día)	V metano (ml/ día)
3	6.7	11%	1125	840	458	320	190	115
7			1220	900	440	310	160	99
11			1250	875	390	250	200	110

Tabla 12: Evolución del volumen de biogás y metano durante el experimento 3

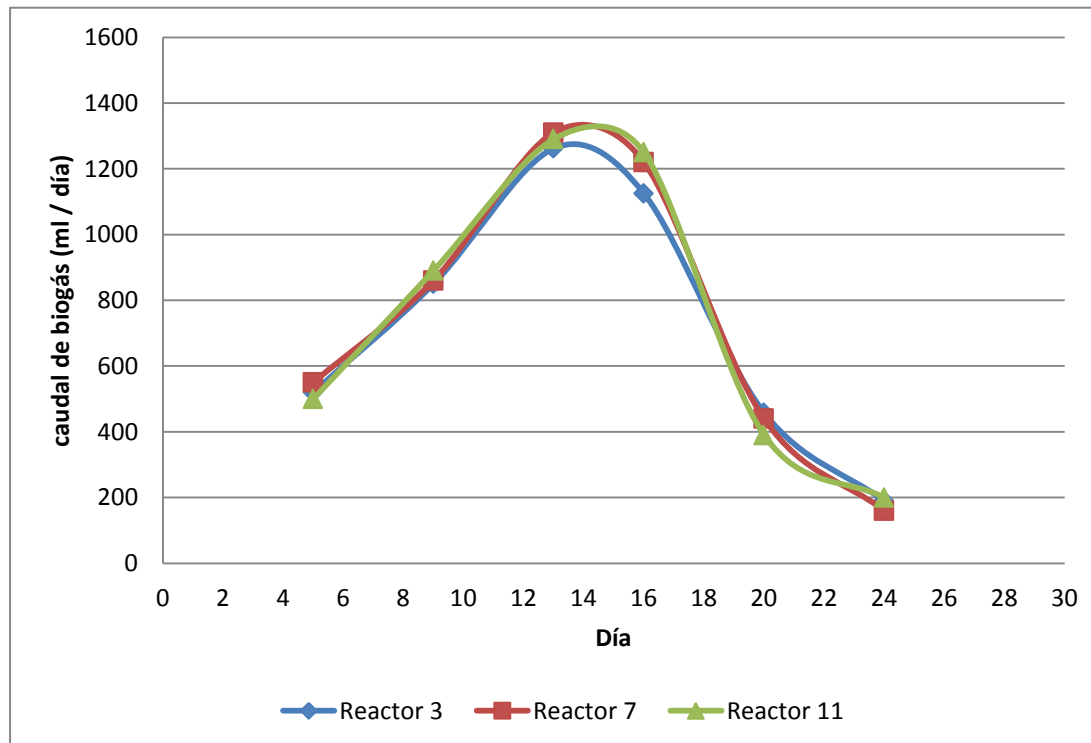


Figura 53: Evolución de la producción de biogás en el experimento 3

#### EXPERIMENTO 4: pH = 7.3 ST = 11%

Estos son los resultados obtenidos de volumen de biogás y metano medidos en los distintos gasómetros para los reactores 4, 8 y 12, con pH = 7.3 y ST= 11%, durante 30 días:

REACTOR	pH	ST	Día 5		Día 9		Día 13	
			V biogás (ml/ día)	V metano (ml/ día)	V biogás (ml/ día)	V metano (ml/ día)	V biogás (ml/ día)	V metano (ml/ día)
4	7.3	11%	350	0	835	150	1110	404
8			400	0	780	153	1120	410
12			400	0	750	195	1090	635

REACTOR	pH	ST	Día 16		Día 20		Día 24	
			V biogás (ml/ día)	V metano (ml/ día)	V biogás (ml/ día)	V metano (ml/ día)	V biogás (ml/ día)	V metano (ml/ día)
4	7.3	11%	900	630	250	165	0	0
8			850	630	375	230	100	60
12			890	660	330	210	150	89

Tabla 13: Evolución del volumen de biogás y metano durante el experimento 4

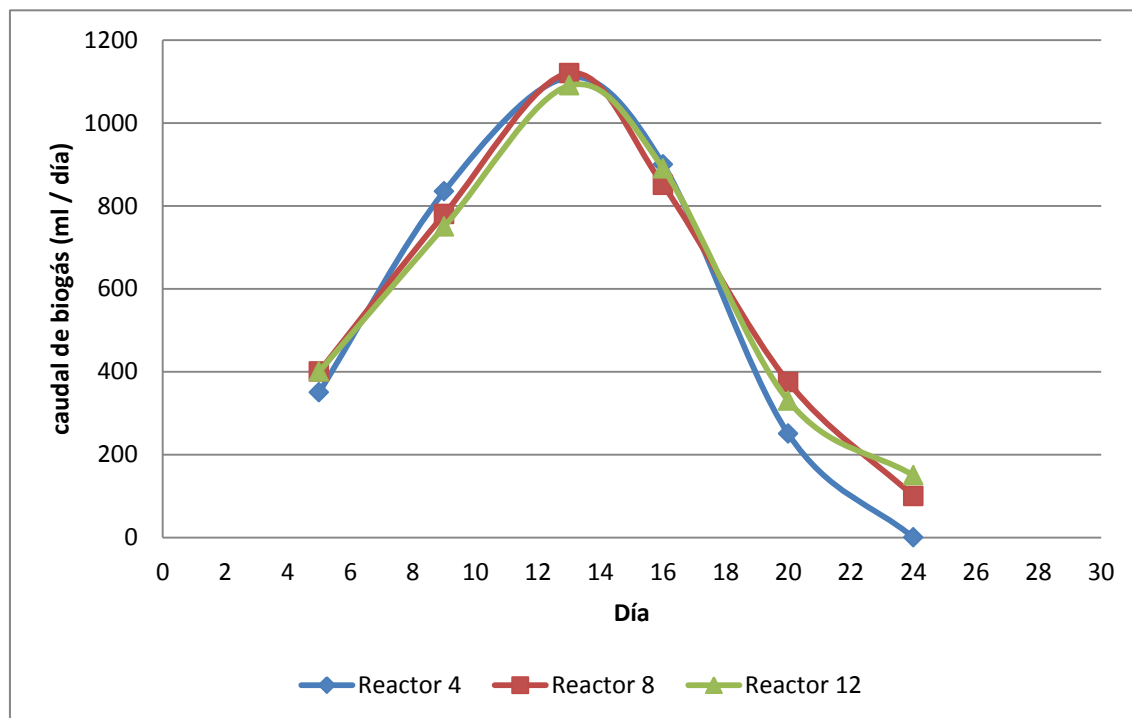


Figura 54: Evolución de la producción de biogás en el experimento 4

En los cuatro casos observamos la misma tendencia en producción de biogás. Esta es un pico de producción a los 13 días y una caída brusca a partir del día 16. También es de reseñar que a partir del cuarto día ya tenemos una cantidad importante de gas en todos los reactores, lo cual no era del todo esperado. En cada experimento tenemos unos valores muy parecidos en las tres repeticiones y una progresión también muy similar. Esto nos permite, para comparar resultados en producción de biogás, hacer una media de esas tres repeticiones de cada experimento y así comparar entre los cuatro (figura 55).

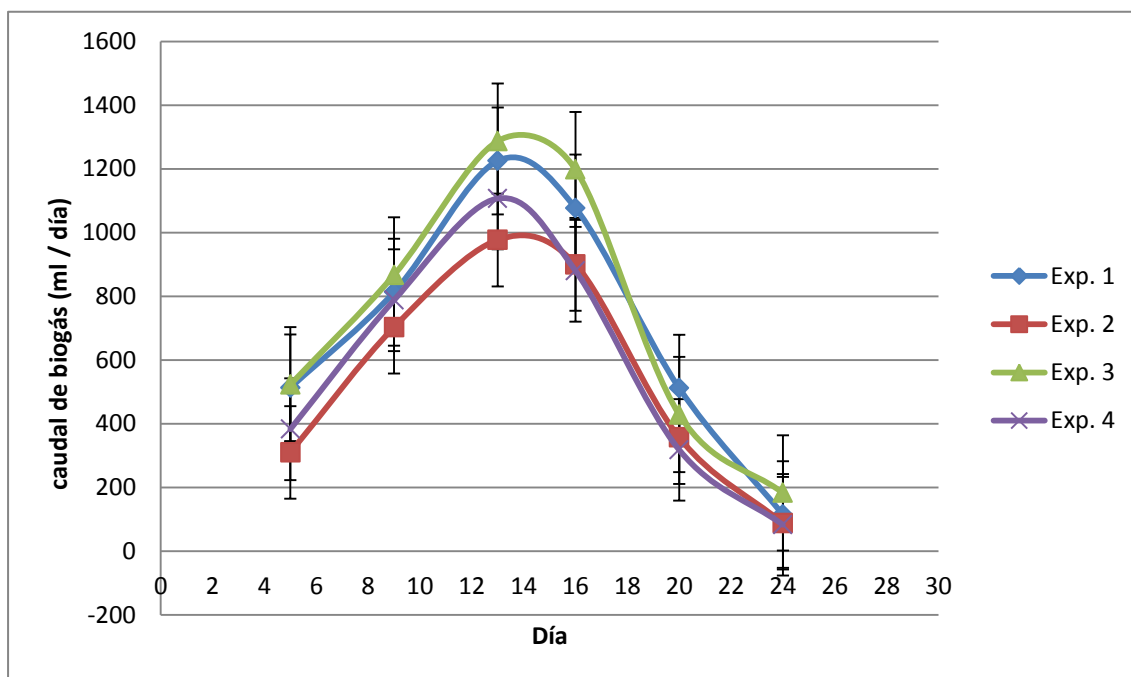


Figura 55: Evolución de la producción media diaria de biogás en los 4 experimentos

En esta gráfica se observa claramente una evolución paralela en los experimentos llevados a cabo y sobre todo la diferencia en el pico de producción de cada uno. El experimento 2, con pH = 7.3 y %ST = 7% ofrece el valor más bajo de generación de biogás, mientras que el experimento 3, con pH = 6.7 y %ST = 11% ofrece el valor máximo, cercano a 1300 ml/ día. En cambio la caída de producción es muy parecida en los 4 casos estudiados, es decir, no parece que ninguno de los juegos de variables del ensayo produzca biogás durante más tiempo que los otros.

La producción total de biogás es mayor según el orden siguiente:

- 1º EXPERIMENTO 3: pH = 6.7 %ST = 11%
- 2º EXPERIMENTO 1: pH = 6.7 %ST = 7%
- 3º EXPERIMENTO 4: pH = 7.3 %ST = 11%
- 4º EXPERIMENTO 2: pH = 7.3 %ST = 7%

De esta clasificación se puede concluir que un pH ligeramente ácido es más favorable en cuanto a producción diaria de volumen de biogás, e igualmente un contenido en sólidos más alto también lo es.

Analizamos a continuación el volumen de metano producido en los reactores, expresando su cantidad en porcentaje respecto al biogás total. Recordamos que normalmente el metano no empieza a producirse hasta pasada mínimo una semana, y que debe llegar a un valor mínimo de 40% para que el biogás sea utilizable como combustible.

Para calcular el porcentaje de metano en cada medida tomada de volumen de biogás basta dividir el valor obtenido en el gasómetro azul (secuestrador de CO<sub>2</sub>) por el obtenido, en el mismo tiempo, en el gasómetro de volumen total.

En esta tabla presentamos la evolución del porcentaje de metano en los 4 experimentos y en cada una de sus tres repeticiones:

EX P 1	REACTOR	pH	ST	Día 5	Día 9	Día 13	Día 16	Día 20	Día 24
	1	6.7	7%	0	16%	45%	58%	69%	64%
	5			0	18%	53%	68%	67%	50%
	9			0	12%	47%	65%	70%	56%
EX P 2	REACTOR	pH	ST	Día 5	Día 9	Día 13	Día 16	Día 20	Día 24
	2	7.3	7%	0	16%	46%	61%	68%	56%
	6			0	16%	44%	65%	69%	67%
	10			0	13%	48%	62%	71%	54%
EX P 3	REACTOR	pH	ST	Día 5	Día 9	Día 13	Día 16	Día 20	Día 24
	3	6.7	11%	0	29%	61%	75%	70%	60%
	7			0	32%	65%	74%	70%	62%
	11			0	29%	63%	70%	64%	55%
EX P 4	REACTOR	pH	ST	Día 5	Día 9	Día 13	Día 16	Día 20	Día 24
	4	7.3	11%	0	18%	36%	66%	66%	0
	8			0	20%	37%	63%	61%	60%
	12			0	26%	58%	62%	61%	59%

Tabla 14: Evolución del porcentaje de metano presente en el biogás en los 12 reactores

Observamos que una vez más los valores de las tres repeticiones de cada experimento son muy similares, por lo que vamos a hacer una media de los porcentajes obtenidos para comparar el metano producido en cada experimento.

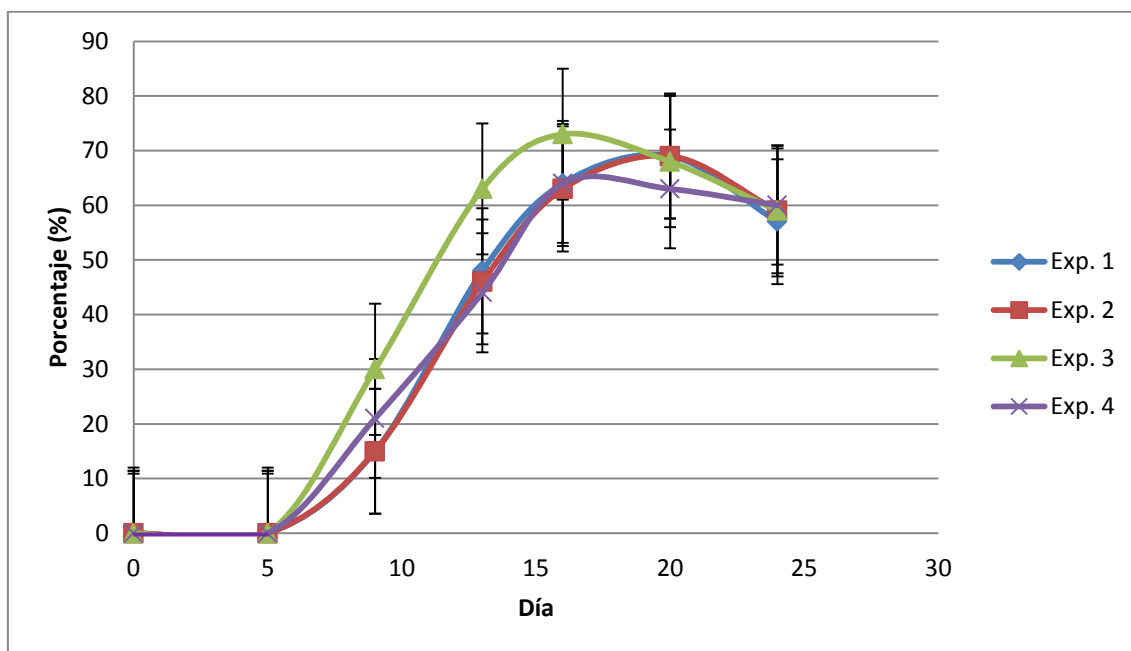


Figura 56: Evolución porcentual en la producción de metano en los 4 experimentos

De esta gráfica observamos que la producción de metano es muy similar en los 4 experimentos, salvo en el experimento 3 que una vez más alcanza un máximo superior a los demás.

Los valores de metano en el biogás encontrados en los 4 experimentos se acercan al 70% a partir del día 15, lo que supone una buena cantidad porcentual de todas las muestras. No debemos olvidar que nuestro gasómetro secuestrador de dióxido de carbono no es eficaz al cien por cien, luego el porcentaje será algo menor en todos los resultados, siendo aun así alto como para afirmar que la calidad del biogás es buena en cuanto a proporción de metano.



### 5. 1. 2- CAPACIDAD CALORIFICA:

Ahora analizamos la capacidad calorífica del biogás, último parámetro pero el más importante para afirmar la calidad del biogás generado. Un biogás normal suele tener un poder calorífico entre 16.7 y 25.1 MJ/m<sup>3</sup>. Para esta medición no es necesario contar con ningún aparato específico, simplemente un mechero Bunsen y un matraz de 250 o 500ml con su soporte correspondiente.

La determinación de la capacidad calorífica está basada en el proyecto fin de carrera de Javier Ocaña Pérez-Cerdá (2011) titulado *"Biodigestor Anaerobio Experimental"*. A continuación explicamos cómo medir este valor, explicando previamente algunos conceptos:

- El calor específico "*c*" (J/g.°C) de una sustancia es la cantidad de calor que se requiere para aumentar un grado la temperatura de un gramo de dicha sustancia.
- La capacidad calorífica "*C*" (J/°C) de esa misma sustancia es la cantidad de calor que se requiere para elevar un grado su temperatura en una cantidad determinada.

Ambas se relacionan según:

$$C = mc \quad \text{donde "m" es la masa en gramos de la sustancia}$$

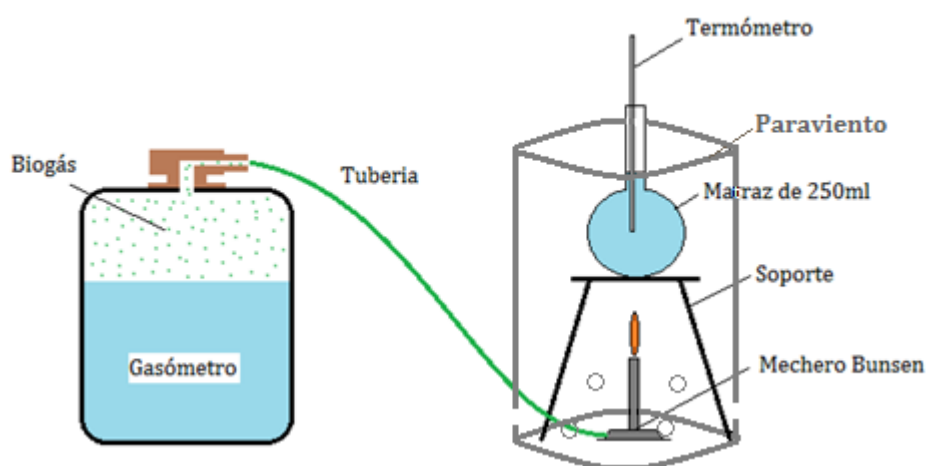
Si se conocen la masa de la sustancia y su calor específico, podemos calcular la cantidad de calor "*q*" (J) que se libera midiendo el cambio de temperatura de la sustancia:

$$q = mc\Delta T$$

Para determinar estos valores en nuestras muestras de biogás nos basamos en el "método alternativo de Junkers" explicado en el documento anteriormente citado. Este método consiste en quemar en condiciones idénticas de presión y temperatura un volumen conocido de biogás, del cual no conocemos su poder calorífico, y un mismo volumen de un gas cuyo poder calorífico sí conocemos. Estos volúmenes se queman consecutivamente para calentar una cantidad de 250 o 500 ml de agua, tomando nota de las dos respectivas variaciones de temperatura. Conocidas entonces las masas de ambos gases, el poder calorífico del gas con el que comparamos y las dos diferencias de temperatura, se determinará el poder calorífico del biogás. Esto es posible siempre y cuando las condiciones en ambas combustiones, en concreto presión, temperatura y posición relativa del mechero con respecto al matraz, sean aproximadamente iguales.

Este método es operativamente sencillo y sus resultados finales no diferirán mucho de los que se obtendrían a presión constante.

Para quemar el biogás utilizamos un esquema como el de la *figura 57*; recuperamos el biogás del gasómetro de volumen, es decir que en lugar de perderlo a la atmósfera una vez tomada la medida, se conecta en la boquilla de salida una tubería con un mechero Bunsen en su extremo. Encendemos el mechero y quemamos el matraz de agua hasta que se acabe el biogás contenido en el gasómetro, midiendo el cambio de temperatura en el agua.



*Figura 57: Esquema del sistema para medir el poder calorífico inferior*

Los cálculos se realizan una vez tomadas las medidas anteriores.

Primero, para un gas cualquiera de masa  $M$ , densidad  $\rho$  y capacidad calorífica  $PCI$  conocida, el calor que genera al quemarse viene dado por la expresión:

$$Q = \frac{PCI \cdot M}{\rho}$$

El calor recibido por el agua al calentarla con este gas será:  $q = mc\Delta T$

El rendimiento de la combustión viene dado por el cociente entre el calor que recibe el agua entre el que desprende el gas al quemarse:

$$\varepsilon = \frac{q}{Q}$$

Este rendimiento será igual para todos los gases, luego para el biogás, el calor que se genera al quemarse será:

$$Qb = \frac{PCIb \cdot Mb}{\rho b}$$

el calor recibido por el agua al calentarla con el biogás será:

$$qb = Magua \cdot c \cdot \Delta T$$

y el rendimiento de esta combustión será el mismo:

$$\varepsilon = \frac{qb}{Qb}$$

De estas ecuaciones podemos ir despejando para hallar la expresión del PCI del biogás:

$$PCIb = Qb \frac{\rho b}{Mb} = \frac{qb \cdot \frac{\rho b}{Mb}}{\varepsilon} = \frac{Magua \cdot c \cdot \Delta T \cdot \rho b}{\varepsilon \cdot Mb}$$

Los valores que aparecen en esta última ecuación son todo lo que necesitamos para hallar la capacidad calorífica del biogás:

- *Magua*: será la elegida por nosotros según el material que dispongamos. En nuestro caso serán 500ml.
- *c*: El calor específico del agua es de  $4.184 \text{ J/g} \cdot ^\circ\text{C}$
- $\Delta T$ : Este valor se medirá y será diferente para cada reactor (*ver tabla 15*).
- $\rho b$ : Tomamos un valor medio de densidad de biogás en fuentes consultadas, aunque no será del todo exacto al no saber qué calidad de biogás disponemos,  $\rho b = 0.77 \text{ kg/m}^3$
- *Mb*: será el valor obtenido de volumen producido en cada reactor en el día 16 de proceso (*ver tablas 10, 11, 12 y 13*), donde la producción de biogás es alta y el porcentaje de metano contenido en él es máximo.
- $\varepsilon$ : Para hallar el rendimiento de combustión necesitaremos un gas alternativo y se hallará según la expresión:

$$\varepsilon = \frac{q}{Q} = \frac{mc\Delta T}{\frac{PCI \cdot M}{\rho}}$$

A continuación explicamos el proceso para calcular el PCI del biogás:

**1º:** Calculamos el rendimiento de combustión; utilizamos gas propano para calentar 500ml de agua mediante un mechero Bunsen, anotando la diferencia de temperatura  $\Delta T$  que se produce en el matraz de agua con 5 litros de gas propano. Para los cálculos consideramos una vez más que 1L de agua equivale a 1 kg. Los valores que necesitamos son:

$$M = 5kg$$

$$m = 500g$$

$$c = 4.184 J/g.^{\circ}C$$

$$PCI_{prop.} = 46 \frac{kJ}{kg}$$

$$\rho_{prop} = 1.83 kg/m^3$$

$$\Delta T = 22^{\circ}C$$

El rendimiento es entonces:

$$\varepsilon = \frac{mc\Delta T}{PCI_{prop.} \cdot M} = \frac{500 * 4.184 * 22}{46000 * 5} = 0.20$$

**Nota:** Al ser las unidades de PCI “kJ/kg” en lugar de “kJ/m<sup>3</sup>”, resulta un error dividir su valor por la densidad del propano, pues la fórmula que hemos aportado trabaja con kJ/m<sup>3</sup>. Por esto hemos eliminado  $\rho_{prop}$  de la fórmula final.

**2º:** Cálculo del PCI del biogás. Lo ideal es calcular, en cada medida de volumen de biogás producido, la capacidad calorífica del mismo y su evolución en función de los días de duración del proceso. Incluso sería más correcto realizar, para cada reactor, varias pruebas distintas para comparar resultados y hacer una media. Sin embargo este proceso, para doce reactores, es demasiado complicado por falta de tiempo material, por lo que solo realizamos una medida en cada reactor coincidiendo con la producción de biogás máxima.

A continuación presentamos una tabla con los datos obtenidos en los doce reactores (*tabla 15*). Recordamos que la fórmula para el cálculo del PCI es:

$$PCIb = \frac{M_{agua} \cdot c \cdot \Delta T \cdot \rho_b}{\varepsilon \cdot Mb}$$

Y que los valores utilizados son:

$$M_{agua} = 500g$$

$$c = 4.184 J/g.^{\circ}C$$

$$\rho_b = 0.77 kg/m^3$$

$$\varepsilon = 0.20$$

$Mb$  y  $\Delta T$  son variables para cada digestor.

Por lo cual la fórmula solo queda en función de las dos variables, que son las que determinaremos experimentalmente:

$$PCIb = \frac{500 * 4,184 * \Delta T * 0.77}{0.20 * Mb} = 8054.2 \frac{\Delta T}{Mb}$$

Los valores calculados para cada poder calorífico de cada reactor vienen directamente en la *tabla 15*:

REACTOR	<i>Mb</i> (g)	<i>T inicial</i>	<i>T final</i>	$\Delta T$	<i>PCI b</i> (MJ/m <sup>3</sup> )
1	12,4	18	42	24	<b>15,59</b>
2	9,4	18	36	18	<b>15,42</b>
3	11,7	19	44	25	<b>17,21</b>
4	9,4	18	35	17	<b>14,57</b>
5	10,9	18	40	22	<b>16,26</b>
6	8,8	18	34	16	<b>14,64</b>
7	12,7	18	44	26	<b>16,49</b>
8	8,9	19	37	18	<b>16,30</b>
9	10,4	19	41	22	<b>16,26</b>
10	9,9	18	35	17	<b>13,83</b>
11	13	18	45	27	<b>16,73</b>
12	9,3	18	36	18	<b>15,59</b>

*Tabla 15: Resumen de valores calculados de capacidad calorífica en los 12 ensayos*

Observamos que los valores son bastante parecidos y en la mayoría de casos son algo bajos para lo esperado, teniendo en cuenta que generalmente el valor de PCI del biogás no baja de 16.7 MJ/m<sup>3</sup>.

Hacemos una media de los valores de cada experimento para comparar:

EXPERIMENTO	PCI (MJ/m <sup>3</sup> )
1	16,04
2	14,63
3	16,81
4	15,49

*Tabla 16: Valor medio de PCI para los cuatro experimentos*

Comprobamos que solo en los experimentos 1 y 3, con pH = 6.7, se consigue un valor de PCI dentro de los rangos habituales. Aun así el valor es igualmente bastante pobre, por lo que en general la capacidad calorífica del biogás generado es baja. Esto puede deberse al residuo utilizado, que posiblemente y como se preveía



no es el idóneo en cuanto a producción de biogás se refiere, con respecto a otros como estiércol animal. Probablemente la cantidad de metano en el biogás sea un poco menor a la calculada y ello repercuta directamente en la capacidad calorífica del gas generado.

## 5.2- RESULTADOS DEL SECADO TERMICO

Una vez terminado el proceso de digestión anaerobia, a los treinta días, se recoge uno por uno el lodo contenido en cada reactor. En nuestro caso no se analiza el biol (producto líquido) pero sí se recoge para posibles usos en el terreno. En cambio el producto sólido se recoge, se filtra en papel poroso para eliminar la mayor cantidad posible de agua, y se introduce en el trómel de secado para proceder a su conversión definitiva en fertilizante para las plantas y terrenos.

El proceso de secado térmico se realiza con una inclinación de aproximadamente 7° y a una temperatura cercana a 80°C. La duración de cada secado fue aproximadamente de 15 minutos. Debido a la poca capacidad calorífica del biogás obtenido éste no se pudo utilizar durante todo el proceso de secado, siendo necesario un aporte de gas comercial para el funcionamiento del trómel.

Igualmente, el análisis de nutrientes nitrógeno, fósforo y potasio no pudo realizarse ni durante ni después del proceso, por lo que no pueden constar en este proyecto. Sólo podemos analizar el tamaño de las partículas de abono y su humedad interna, lo que reduce bastante la calidad de los resultados que pretendíamos obtener.



*Figura 58: Imagen del lodo obtenido tras digestión anaerobia y antes de secado*

Lo único que podemos analizar finalmente es la diferencia, de un experimento a otro, en la calidad del fertilizante obtenido respecto a su aspecto físico, es decir el diámetro de partícula, su estabilidad, facilidad de descomponerse y humedad interior. En general, en los doce reactores, se observa bastante similitud en todos estos aspectos, por lo que no resulta necesario explicar uno por uno los resultados en cada digestor y nos limitaremos a dividir el análisis en experimentos.

Veamos por ejemplo en la *figura 59* el aspecto que presentan los granos de fertilizante obtenidos en el primer experimento (recordamos, pH=6,7 y %ST=7):



*Figura 59: Bioabono obtenido tras secado térmico (experimento1)*

Observamos en esta imagen que el diámetro de las partículas es bastante adecuado excepto algunas excepciones de granos demasiado voluminosos. Es obvio que en estos últimos, al descomponer algunos de ellos, observamos una humedad interna bastante importante pues el secado solo ha sido superficial. En general en este experimento los granos de fertilizante están secos por dentro y tienen un tamaño aceptable, pero aun así las predicciones eran más optimistas en cuanto al diámetro de los granos, que esperábamos más pequeño.

En el experimento 2 los resultados son similares a la *figura 59* por lo que sacamos las mismas conclusiones. Sin embargo en los experimentos 3 y 4 sí observamos una diferencia grande. Los granos obtenidos son más grandes que los anteriores y más húmedos internamente. Esto puede deberse a que en estos dos experimentos el %ST era mayor, y por tanto el residuo estaba más apelmazado tanto al principio como al final de la fermentación anaerobia. Esto puede dificultar durante el secado su descomposición en granos más pequeños.



*Figura 60: Bioabono obtenido tras secado térmico (experimento 3)*

Como observamos en la *figura 60* la mayor parte de granos de abono son demasiado grandes y probablemente poco útiles para alimentar al terreno, pues un grano tan grande tarda mucho en descomponerse y su alta humedad influye en su rendimiento. Teniendo en cuenta que el secado térmico se realizó con los mismos parámetros velocidad, temperatura e inclinación en los cuatro experimentos, podemos concluir que a mayor contenido en sólidos totales, debido al apelmazamiento que se produce, el secado posterior es más dificultoso. Esto sin embargo no nos hace pensar en rechazar contenidos en sólido de ese nivel, sino que probablemente habría que variar las condiciones de secado, obligando a que cuando %ST sea más alto el sólido permanezca más tiempo en el trómel rotatorio, de manera que se produzcan más giros que fragmenten la materia hasta conseguir granos más pequeños, secos y duros.

En general la conclusión del secado térmico realizado es que hace falta más velocidad en el trómel para que el producto reciba más impactos y se fragmente en granos más pequeños, pero a su vez que la inclinación sea menor para que se mantenga durante más tiempo en contacto con el aire caliente y así obtengamos partículas menores y menos húmedas. Conviene tener esto en cuenta para futuros secados de material, ya que en nuestro proyecto no dio tiempo a realizar ensayos diferentes por falta de tiempo. Convendría igualmente poder comparar el contenido en nutrientes de cada muestra para evaluar en los cuatro experimentos que fertilizante ofrece mejores prestaciones.

## 6. DESARROLLOS FUTUROS

Como ya hemos explicado, el primer objetivo de este proyecto fue construir una instalación que permitiera diversos ensayos de futuro sobre digestión anaerobia y secado térmico. Una vez realizado un primer ensayo con valores distintos de pH y contenido en sólidos, y tras el secado térmico y análisis de resultados, podemos ir acotando valores para estos parámetros estudiados, pero no podemos dejar de probar con otros distintos que podrían proporcionar un producto aún mejor. Por ello surgen cantidad de posibilidades para futuros usos de la instalación que pasamos a proponer a continuación:

- Experimentar con valores de otros parámetros de la misma manera que en el ensayo presentado en el proyecto, es decir, seguir buscando combinaciones de dos variables distintas, con tres repeticiones cada una, de manera a acotar los valores óptimos para producción de biogás y fertilizante de calidad. Los parámetros objeto de estudio serían:
  - Temperatura: Ya hemos ensayado con una temperatura constante de 35°C y por tanto del rango mesofílico; convendría comparar distintas temperaturas de rangos diferentes para comprobar su efecto sobre el producto obtenido. Una posible opción es tratar la mitad de los reactores a 35°C y la otra mitad a una temperatura del rango termofílico, por ejemplo cercano a los 50°C. Esta opción encarecería el experimento pues sería complicado obtener esa temperatura, pero los resultados obtenidos podrían ser interesantes.
  - pH: Como ya hemos comprobado, parece más conveniente según nuestros resultados un pH ligeramente ácido en términos de producción de biogás. Pero también convendría ensayar un pH aún más bajo, cercano a su valor límite, por ejemplo 6.3, para ver si se encuentra alguna diferencia notable en los resultados. Esta propuesta, al contrario que la anterior, abarata y simplifica el proceso pues el pH del sustrato se acerca más a estos valores que por encima de 7, lo que supondría menor gasto de tiempo en adición de cal lechosa.
  - Sólidos totales: Conviene igualmente, a pesar de haber concluido en nuestro experimento que el valor que parecía idóneo para producción de gas es cercano a 11%, probar con otros valores más bajos, pues éste %ST dificulta el trabajo de toma de muestras y homogeneización de mezcla, al ser notablemente el sustrato más pastoso en los primeros días de digestión.
  - Relación C/N: ya hemos explicado la importancia de este parámetro en el apartado de fundamentos. Nosotros no hemos podido analizarlo en nuestro



proyecto, por lo que sería conveniente probar con valores distintos de él y cercanos a sus límites, que son, recordamos, 15:1 y 45:1.

- Otra opción interesante que nos permite el complejo construido es probar con un residuo orgánico distinto al vegetal, o incluso con una mezcla entre ambos. En concreto nos referimos al residuo orgánico animal, cuya eficacia es más que probada en producción de biogás y también en su uso como abono para las plantas. El objetivo del proyecto es utilizar residuo vegetal debido a los cientos de toneladas que se producen diariamente de este tipo de residuo, pero esto no significa que no exista un número también importante de residuos de origen animal en granjas y también en mercados de abastos igual de inaprovechados que los anteriores. Hasta la fecha, en cuanto a producción y calidad de biogás se conoce el estiércol de cerdo, el humano y la gallinaza como un residuo animal que proporciona resultados excelentes. Por tanto las distintas propuestas serían:
  - Probar, en igualdad de condiciones en cuanto los demás parámetros ambientales, cuál de los dos residuos genera mayor cantidad de biogás, mayor cantidad de metano, un fertilizante de mejor calidad, más sencillo de secar o con menor humedad, etc...
  - Combinar ambos residuos, conociendo la proporción animal/vegetal y probar con distintos porcentajes de ambos cuál genera mejores resultados.
- Existen otros dos parámetros influyentes en la fermentación anaerobia que tuvimos que omitir en nuestro proyecto, la demanda biológica de oxígeno DBO y la demanda química de oxígeno DQO. Estos parámetros representan indirectamente el contenido de materia orgánica de un residuo a través del oxígeno necesario para oxidar químicamente (DQO) o biológicamente (DBO) la materia orgánica. No son parámetros con los que se pueda experimentar usándolos como variables, sino que permiten un seguimiento más detallado de la calidad del proceso. Para medir ambos se necesita un aparato de espectrofotometría similar al de análisis de nutrientes, por lo que tampoco pudimos realizar un seguimiento durante el proyecto. Al analizar el contenido en DBO y DQO del sustrato introducido en el reactor y de la materia obtenida tras la digestión se comprueba en qué medida se está eliminando la materia orgánica en nuestro digestor, llamado también eficiencia de remoción. Estas medidas conviene realizarlas una vez por semana o cada quince días de proceso.



- Durante el proceso de peletización del fango, es posible incorporar al mismo nutrientes complementarios y sustancias fitosanitarias, permitiendo de esta manera la obtención de un compost fácilmente dosificable por el agricultor y que libere de manera ralentizada parte de sus componentes, de manera que se eviten efectos indeseables como es el de su arrastre por el agua de riego o lluvia y su incorporación a las aguas subterráneas y superficiales o su fotodegradación solar.
- Aprovechando el fuerte sol en la zona y la altura, se puede secar el producto fertilizante previamente a su paso por el trómel de secado. De esta forma se elimina la primera capa de humedad y el secado térmico posterior puede tener mayor rendimiento, permitiendo además un importante ahorro energético.
- Como ya hemos señalado en el *apartado 5.2*, conviene realizar distintos secados con distintas inclinaciones para determinar que ángulo es el más adecuado para que el residuo avance y esté más tiempo en contacto con los gases calientes. El trómel diseñado permite regular inclinación y velocidad de giro, lo que supone poder hacer ensayos sobre el compost para determinar los parámetros idóneos.
- Añadir una máquina peletizadora: el destino final de esta instalación es convertirse en una planta de pellets de fertilizante. Para ello será necesario, cuando los parámetros estudiados sean convenientes y el proceso perfectamente controlado, añadir una máquina compresora para formar pellets de fertilizante, es decir el mismo grano obtenido tras secado más comprimido aún y de tamaño homogéneo, facilitando su almacenamiento, transporte y alimentación al terreno.

## 7. PRESUPUESTO

MATERIAL	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO (\$)	PRECIO TOTAL (\$)
Bidón de plástico (20L)	17	8	136
Llave de bola dispensadora	12	1,25	15
Adaptador de tanque ½"	41	1,87	76,67
Llave de bola ½"	54	1,30	70,20
Tee Flex macho ½"	11	0,25	2,75
Tee Flex hembra ½"	26	0,47	12,22
Unión Flex ½"	31	0,13	4,03
Neplo Flex ½"	66	0,20	13,20
Abrazadera ½"	112	0,20	22,40
Abrazadera ¾"	12	0,65	7,80
Calefactor	2	35	70
Tanque de gas	1	55	55
Unión Flex ½" x 10cm	12	0,65	7,80
Tapón hembra H3 ½"	2	0,35	0,70
Reductor HG de ½" a ¼"	17	0,45	7,65
Acople rápido conector ¼"	3	3,24	9,72
Acople rápido macho ¾"	13	2,28	29,64
Manguera de presión para gas ¼"	5 metros	1,10 /m	3,30
Manguera transparente ¾"	2 metros	0,93 /m	1,86
Manguera de jardín ½"	40 metros	0,53 /m	21
Codo en PVC de 90° y ½"	8	0,73	5,84
Válvula "Check"	1	14,40	14,40
Teflón	10	0,60	6
Silicona	3	1,40	4,20
Pegamento Epoxy para plástico	3	5,57	16,71
Papel pH	1	14	14
Piedras difusoras	7	2	14
Taladro "Skil"	1	29,40	29,40
Broca HSS ¼"	2	1,78	3,56
Cutter	1	0,98	0,98
Rueda neumática	1	28,20	28,20
Cinta de embalaje transparente	2	0,63	1,26
Candado	1	8,30	8,30
			TOTAL
			713,79 \$
			540,75 €

Tabla 17: Presupuesto para la instalación de digestión anaerobia

MATERIAL	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO (\$)	PRECIO TOTAL (\$)
Chapa de metal galvanizado 1,20x0,6x0,01	2	100	200
Chapa de metal galvanizado 0,60x0,6x0,01	1	50	50
Soporte estructural	1	160	160
Eje de metal galvanizado cilíndrico 0,60x0,10	2	120	240
Aspa de metal galvanizado cilíndrico 0,20x0,02	12	30	360
Rodamiento de bola	2	110	220
Polea	1	120	120
Engranaje	1	115	115
Motor de 1kW	1	299	299
Chapa de metal	4	47,5	190
Soldadura		230	230
Quemador	1	56	56
			TOTAL:
			2240 \$
			1697 €

Tabla 18: Presupuesto para la construcción del trómel rotativo

PRESUPUESTO DIGESTORES	PRESUPUESTO TROMEL	PRESUPUESTO TOTAL
713,79 \$	2240 \$	2953,79 \$
540,75 €	1697 €	2237,75 €

Tabla 19: Resumen de presupuestos totales para el proyecto

## 8. BIBLIOGRAFIA

### 8.1- DIGESTION ANAEROBIA

- De la Torre Cáritas, Nadia (2008): *"Digestión Anaerobia en comunidades rurales"*. PFC Universidad Carlos III de Madrid
- Ocaña Pérez-Cerdá, Fr. Javier (2011): *"Biodigestor Anaerobio Experimental"*. PFC Universidad Carlos III de Madrid
- Urieta Aguado, Francisco. (2010): *"Diseño y construcción de un sistema ORSAT modificado para el análisis de biogás"*. PFC Universidad Carlos III de Madrid
- Luis Rodríguez, Francisco Javier (2010): *"Puesta en marcha de un laboratorio para la producción de biogás en Nicaragua"*. PFC Universidad Carlos III de Madrid
- Bayona Villanueva, Javier. (2010): *"Diseño de una instalación de biogás mediante digestión anaerobia y valorización de los residuos obtenidos"*. PFC Universidad Carlos III de Madrid
- Fernández García, Belén. (2007): *"Digestión metanogénica de purines porcinos y "stripping" de Nitrógeno"*. GIRO Centro Tecnológico. España.
- Tchobanoglous, George. Theisen, Hilary. Vigil, Samuel. (1994): *"Capítulo 14: Tratamiento de residuos"*, pág. 755 – 794. "Gestión Integral de Residuos Sólidos" Mc Graw Hill, Aravaca, Madrid.
- Alcarraz Curi, Mario: *"Producción rápida de bioabono por digestión anaeróbica"*. Manejo Ecológico de Suelos. Pág. 107 – 113.
- Soria Fregoso, Manuel de Jesús. Ferrera Cerrato, Ronald. Etchevers Barra, Jorge. Alcántar González, Gabriel. Trinidad Santos, José. Borges Gómez, Lizette. Pereyda Pérez, Gaspar. (2001): *"Producción de biofertilizantes mediante biodigestión de excreta líquida de cerdo"* Terra Latinoamericana. Universidad Autónoma de Chapingo, México. **Volumen 19 N°4**, págs. 353 - 362.
- Pérez García, Alejandro. Mancebo del Castillo, Uriel. Ortega Chárleston, Luis. Noyola Robles, Adalberto (2000): *"Digestión Anaerobia no convencional de lodos biológicos utilizando un reactor tipo UASB"*. Universidad Nacional Autónoma de México, págs. 1 – 16.
- Buenrostro, Otoniel. Cram, Silke. Bernache, Gerardo. Bocco, Gerardo (2000): *"La digestión anaerobia como alternativa de tratamiento a los residuos sólidos orgánicos generados en los mercados municipales"*. Revista Internacional de Contaminación Ambiental. Universidad Autónoma de México. **Volumen 16 N°1**, págs. 19 – 26.

- Fonte Hernández, Aramis. Martínez Alonso, Nelson. (1999): *"Digestión anaerobia de la cachaza bajo condiciones de acidificación pronunciada"*. Tecnología Química. **Volumen 19 N°1**, págs. 36 – 39.
- <http://www.emison.com/secaderos.htm> (última visita 12/06/2011)
- <http://www.3tres3.com/medioambiente> (última visita 01/02/2012)
- <http://biodigestores.org> (última visita 07/02/2012)
- <http://lasenergiasrenovables.com/noticias/biomasa/purinesybiogasplandegestion/index.html> (última visita 01/03/2012)
- <http://www.ruralcostarica.com/biodigestor-2.html> (última visita 15/02/12)
- [http://aql-consultores.com/libro\\_biogas.htm](http://aql-consultores.com/libro_biogas.htm) (última visita 23/02/2012)
- <http://es.wikipedia.org/wiki/Biodigestor> (última visita 23/01/2012)
- [www.apisamedioambiente.com](http://www.apisamedioambiente.com) (última visita 29/05/2011)

## 8.2- SECADO TERMICO

- Mestre, M y Galin, R. (2002): *"Secado Térmico de fangos"*. Ingeniería Química, pág. 154 – 157. Madrid
- Elías Castells, Xavier. (2002): *"El secado térmico de fangos de EDAR y su disposición"*. Universidad Pontificia Bolivariana Tecnología del agua. **Nº 226**, pág. 28 – 47.
- Pina Artal, Tomás (1999): *"Secadero rotativo para productos agroalimentarios perfeccionado"*. Ingeniería del Secado S.L. Zaragoza
- Ayerbe Pejón, Juan José. Ayerbe Pejón, Rafael (2004): *"Sistema mejorado de deshidratación en trómel rotativo"*. Agro Pirineos Ayerbe S.L. Yéqueda, Huesca.
- Luque Ruiz, Andrés (2010): *"Sistema de inyección de gases en el interior de un trómel de secado"*. Grande Grupo Andaluz de Seguros S.L.
- Ramírez Villapudua, José. Sáinz Rodríguez, Roque. (2007): *"El Compostaje"* Investigadores de Agrobiológica S.A. Culiacán, Sinaloa, México.
- [http://www.otersu.es/pages/prodesa\\_2.asp](http://www.otersu.es/pages/prodesa_2.asp) (última visita 17/01/2012)
- <http://www.emison.com/secaderosrotativos.htm> (última visita 17/01/12)
- <http://www.prodesa.net/default.asp?id=156> (última visita 15/01/2012)
- <http://www.aguasdevalencia.es/portal/web/Negocios/Depuracion/SecadoTermico.html> (última visita 15/01/2012)
- <http://www.searsa.es/html/secadotermico.htm> (última visita 28/02/2012)
- <http://www.youtube.com/watch?v=le-Nmg0q9jE&NR=1> (22/02/2012)